ゲームのための色彩工学

CEDEC2016 / Hajime UCHIMURA @ Polyphony Digital Inc.

AGENDA

- イントロダクション
- 目と脳と色の仕組み
- 標準観察者を求める
- 色空間と相互変換
- 色の計測デバイス
- レンダリングと色の出力
- 弊社事例紹介
- appendix.

おことわり

- ゲーム用の色彩工学なので、本来の色彩工学と少し違う部分があります。
- エンジニアリングチュートリアルです。
- 色のデザインの話は、ありません。
- モニタのキャリブレーションは済んでるものとして話します。
- P型やD型の方、グラフの色が判別しにくかったら聞いてください！
- 間違ってたらその場で教えてください！！みんなで勉強しましょう！

今日の目標

- 色について、検索のとっかかりを覚える。
- なんとなく、正しそうな色の計算方法を覚える。
- なんとなく、正しそうな撮影方法とか機材を選べるようになる。
- なんとなく、テレビの出力設定とかを正しく選べるようになる。

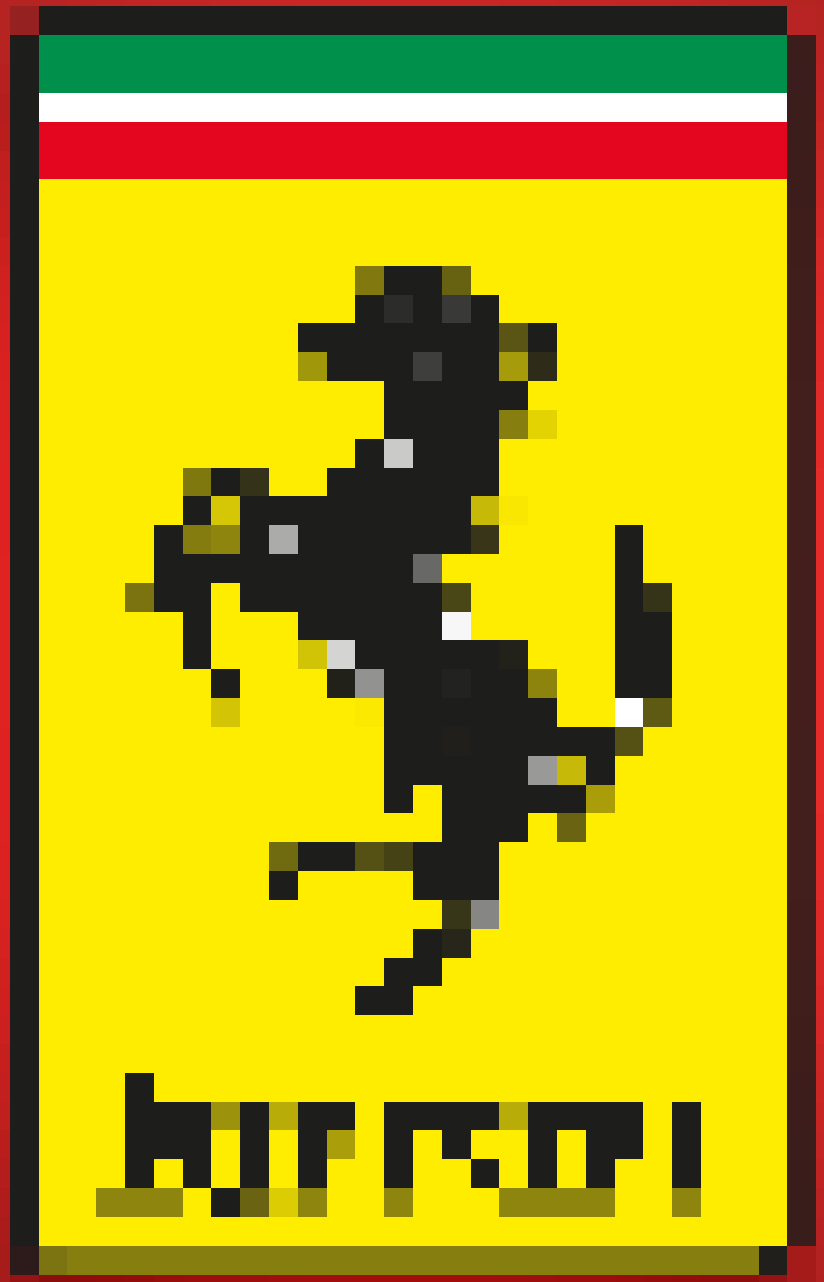
1.イントロダクション

なぜ色の勉強をするのでしょうか？

ある日、社長がやって来て言いました。

「この車、もっと朱色だよね」

「もっと朱色」ってどんな色？？？？？



実物を買う？
買えません。

色は、デザイナーと
エンジニアの共通言語です。

色は、クリエイターと
ユーザーの共通言語でもあります。

光や色の客観表現(物理量表現)を用いて
間違いの少ないコミュニケーションを取りましょう。

ノンフォトリアルなゲームでも
アーティストとエンジニアで
色の話をすることはあるはず

色、ちゃんとやりましょう。

2.目と脳と色の仕組み

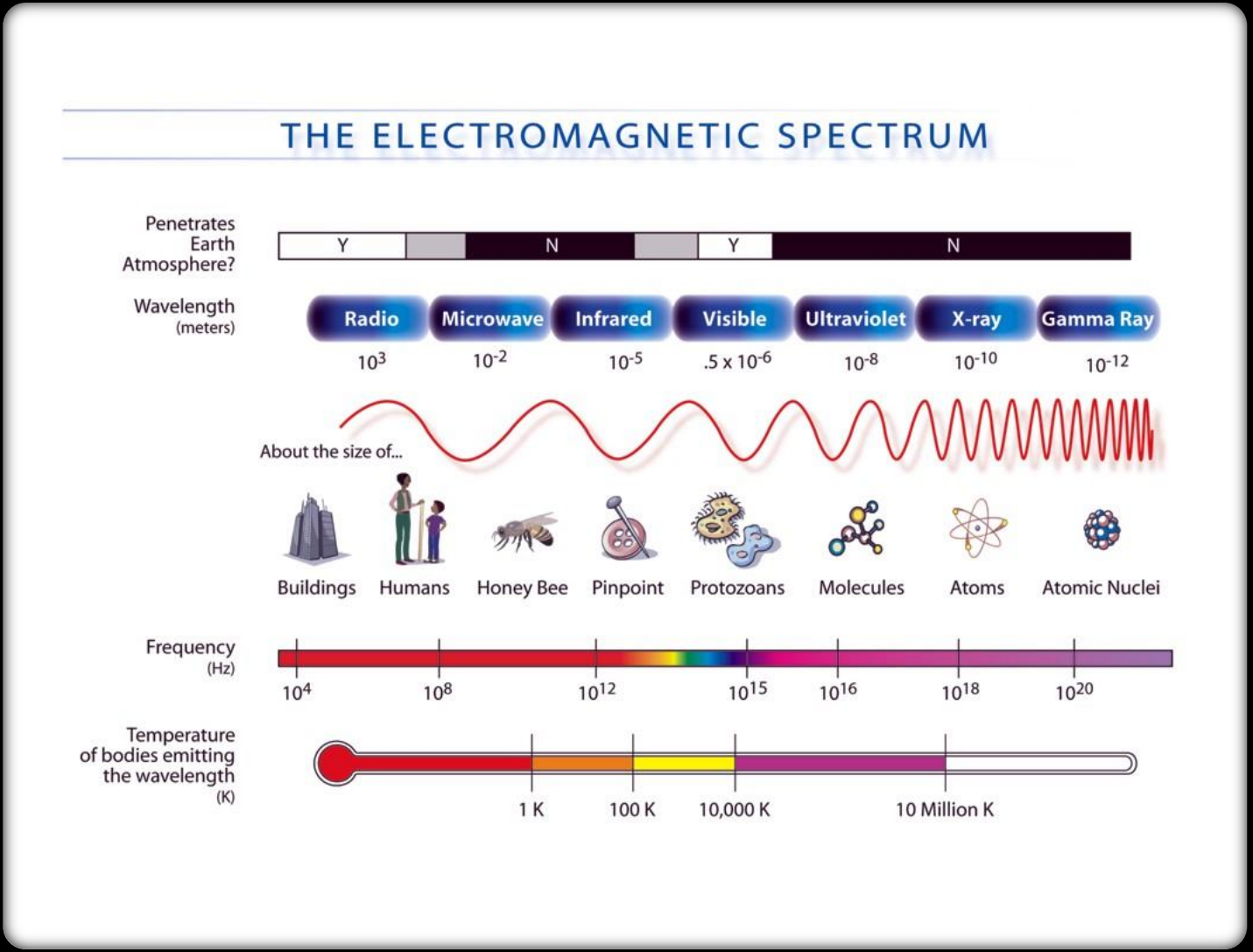
光を見ると、目と脳が働き、色を認識します。

光がないと、色は見えません。

光

電磁波

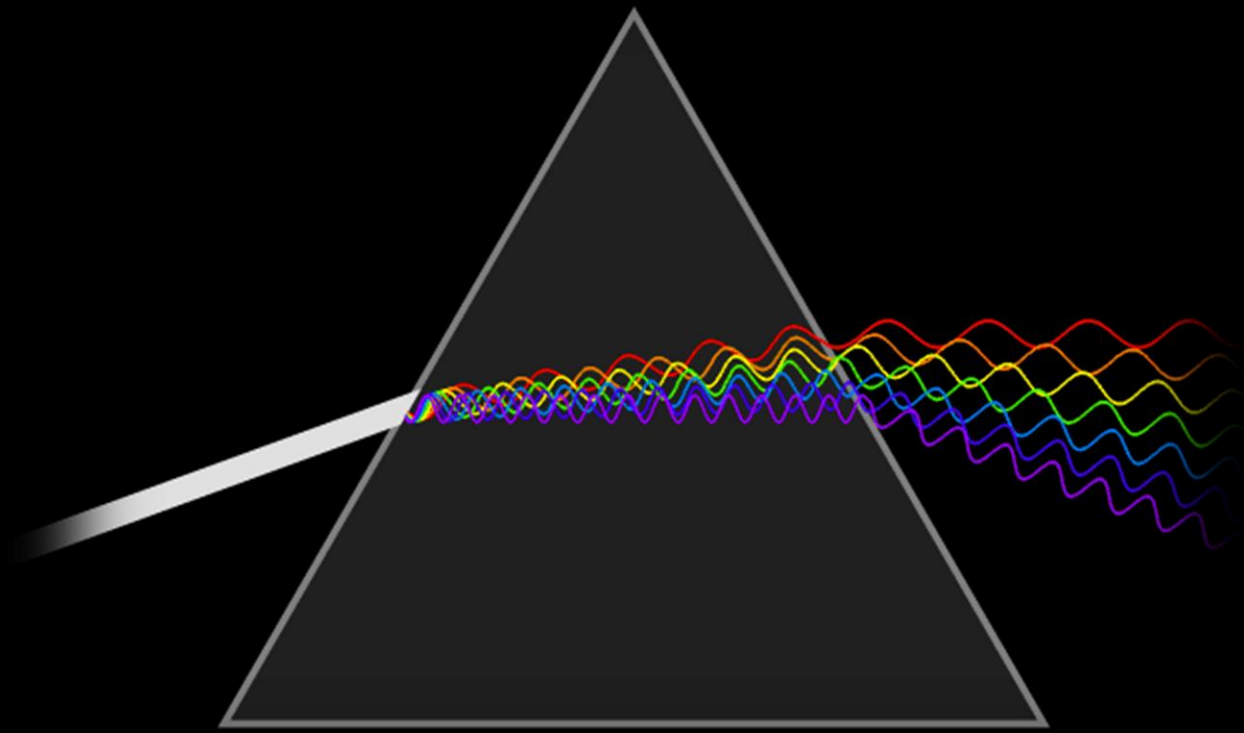
- 光は、電磁波です。
- 波長360-800nmが「可視光」



By Inductiveload, NASA. Translation by t7o7k - Translation from English version, CC0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15075981

用語定義

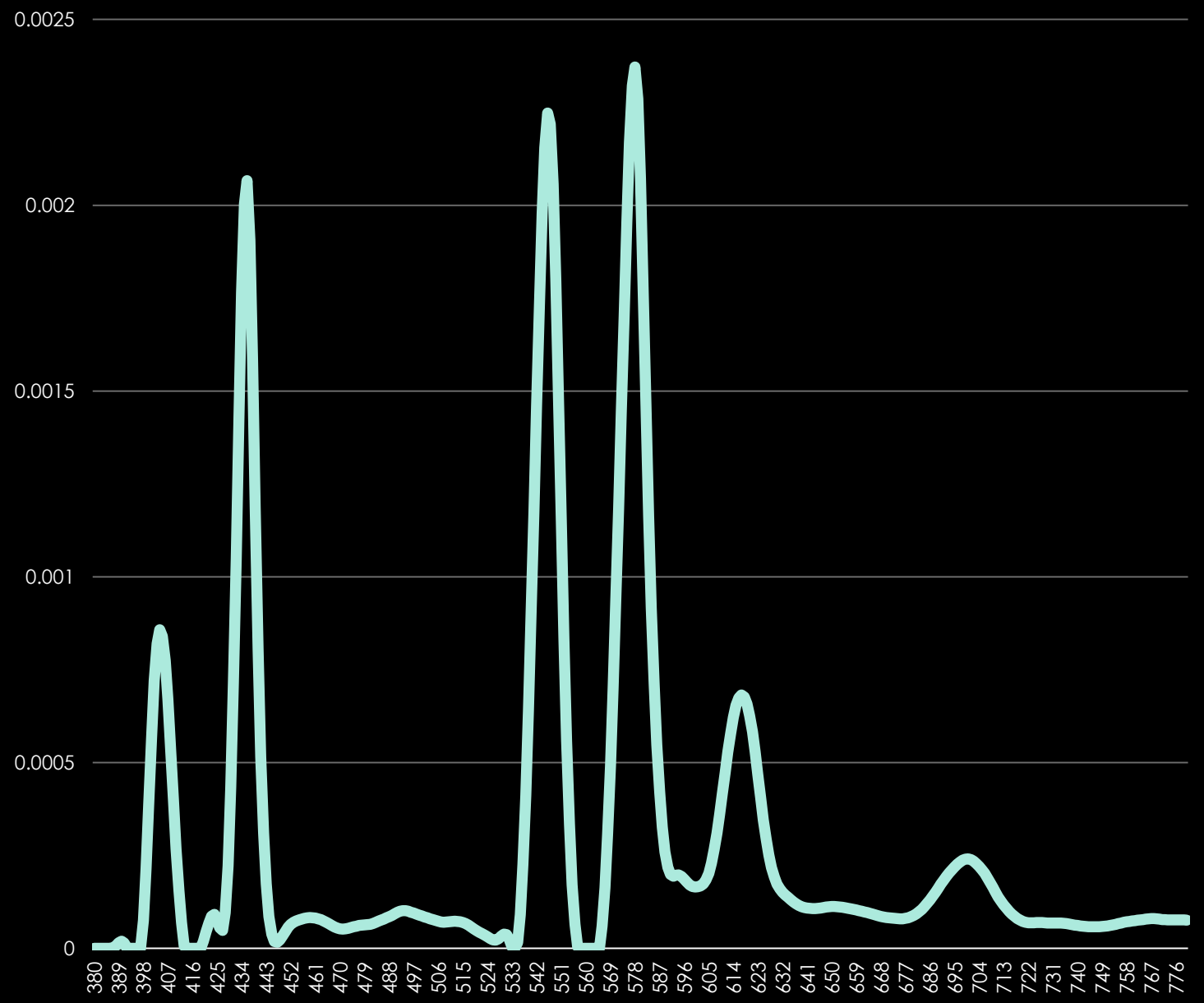
- 「分光」：波長ごとに扱うこと
- 「スペクトル」：波長ごとの分布



スペクトル例

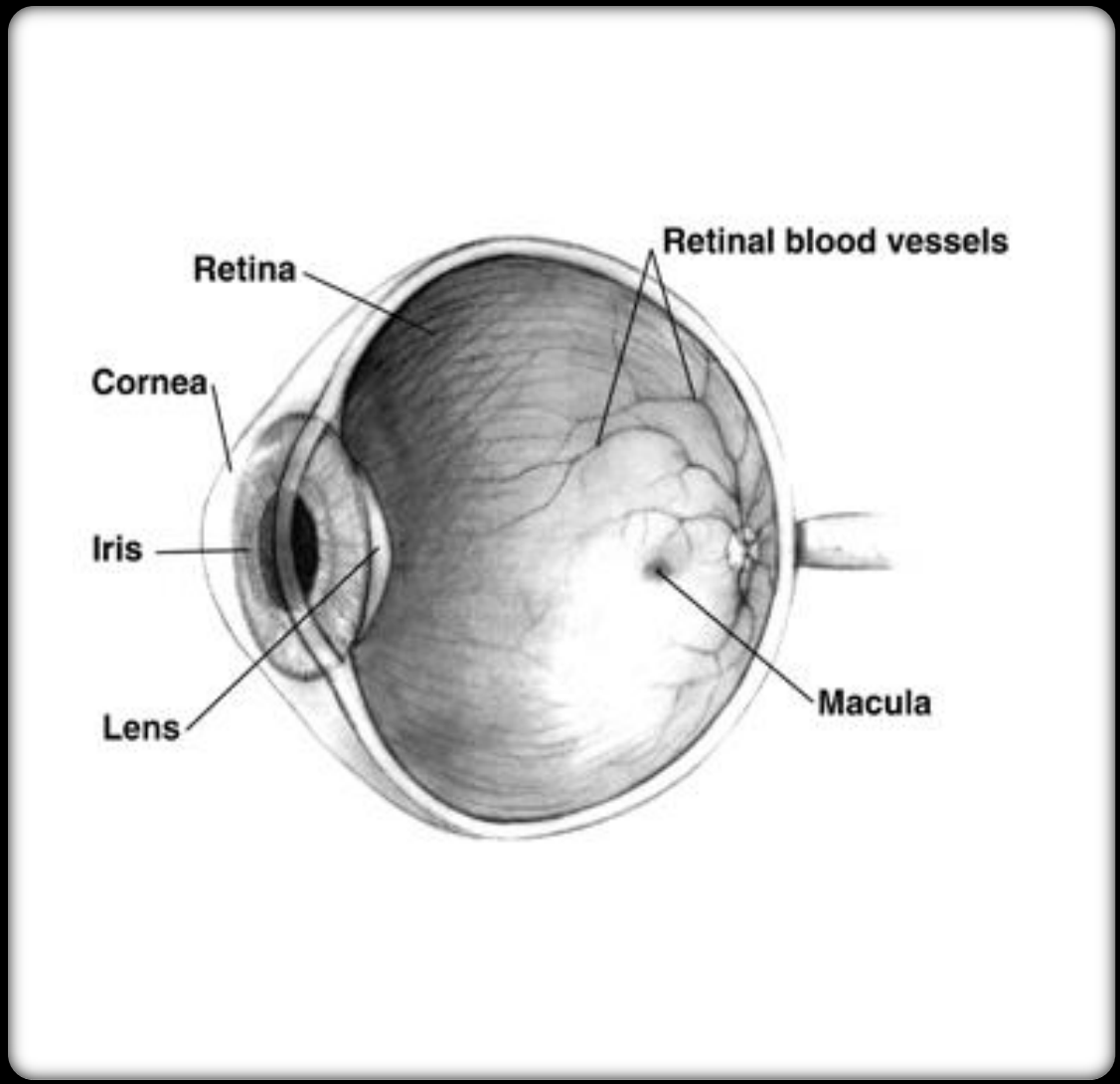
自宅ライトの
波長ごとのエネルギー。

波長 λ[nm] に対して
$F(\lambda)$
と書くことにする



目の構造

- 角膜
- 虹彩
- 水晶体
- 網膜



By NIH National Eye Institute - [1], パブリック・ドメイン,
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=267708

網膜

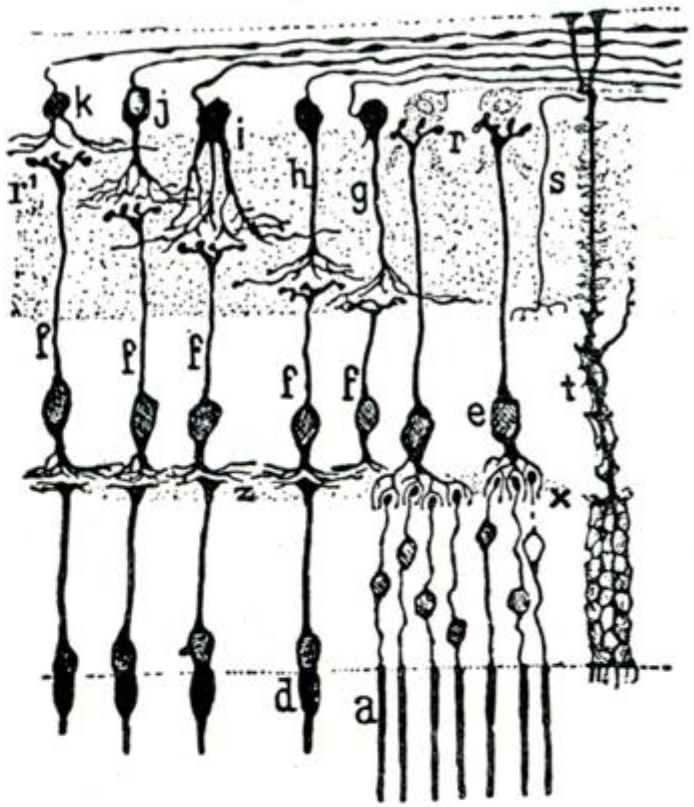


Abb. 634.

erfläche der Retina. Flächenansicht. (v. MICHEL.)

res. Chromsilber-Imprägnation. (CAJAL.)

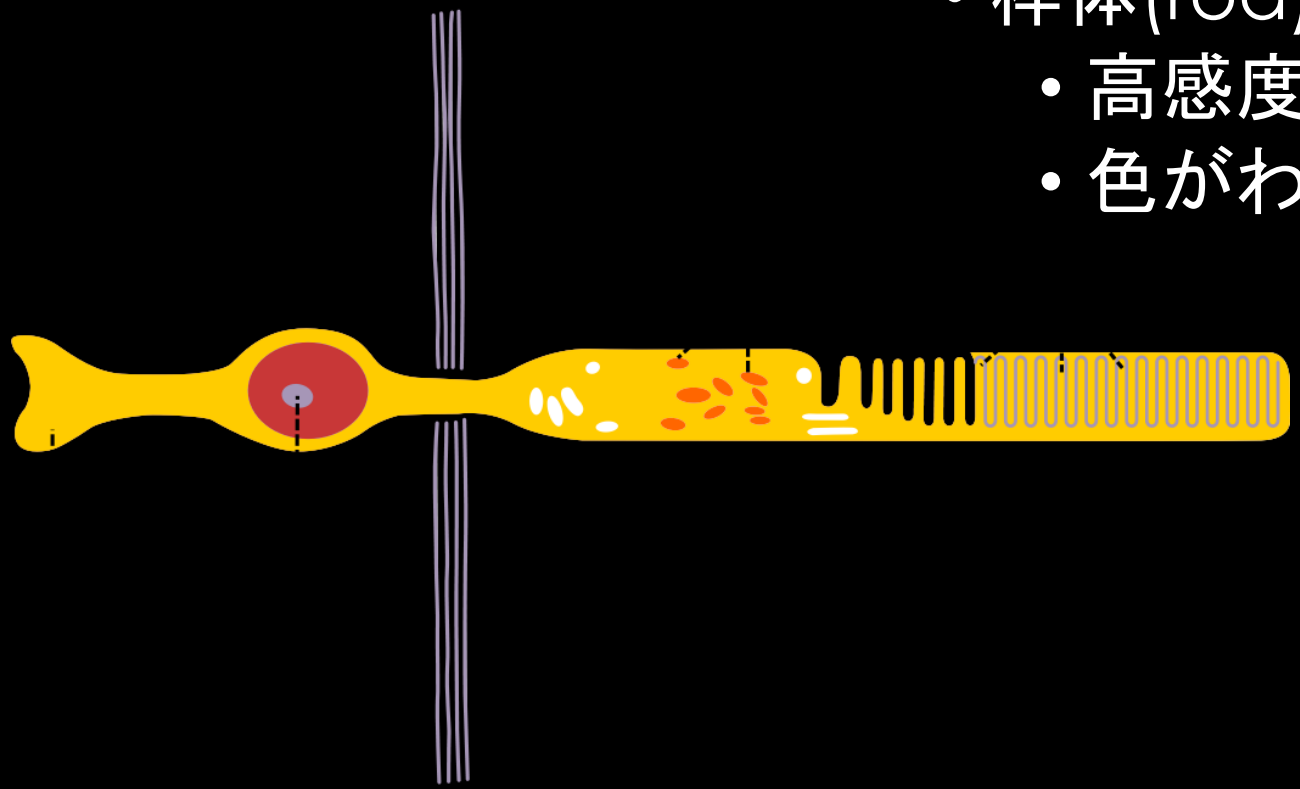
- 網膜には二種類の視細胞がある
- 視細胞が光刺激を神経信号に変換する

- 刺激の量を「刺激値」と呼ぶ。

http://www.anatomy.med.keio.ac.jp/funatoka/anatomy/Rauber-Kopsch/band2/II-634.html より引用

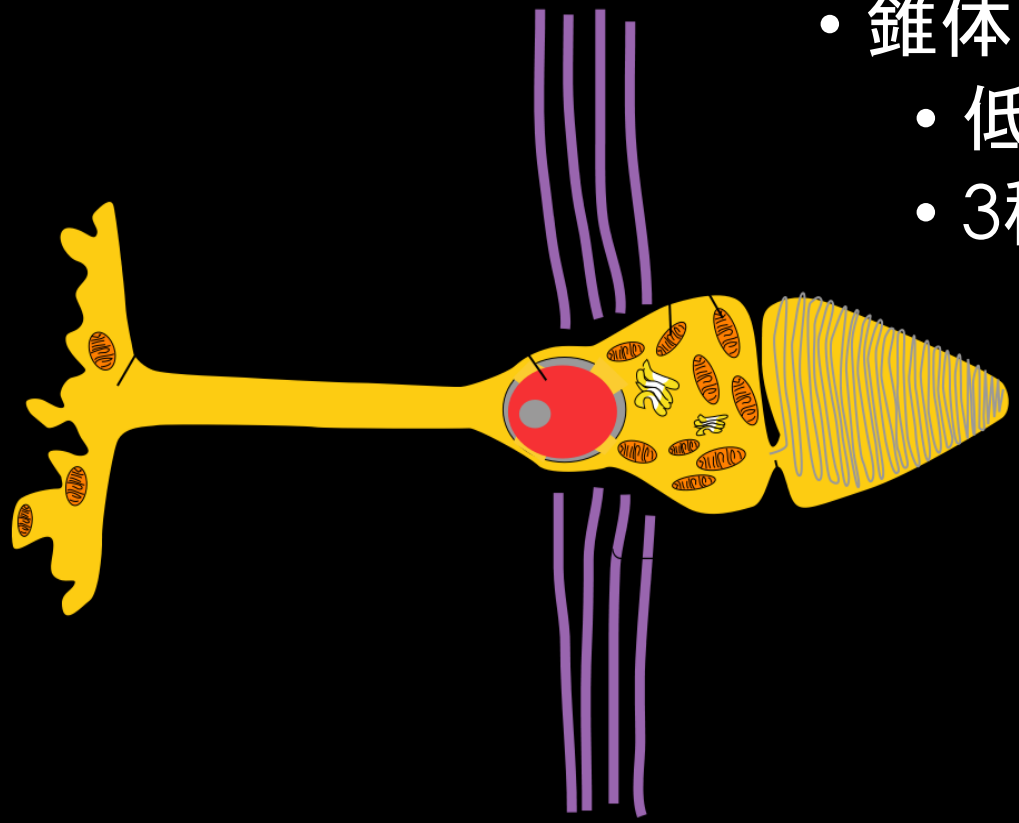
桿体(ROD)

- 桿体(rod)
  - 高感度
  - 色がわからない



By Distorted - 投稿者自身による作品, Image based on File:Cone cell.png, CC 表示-継承 3.0,
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10746006

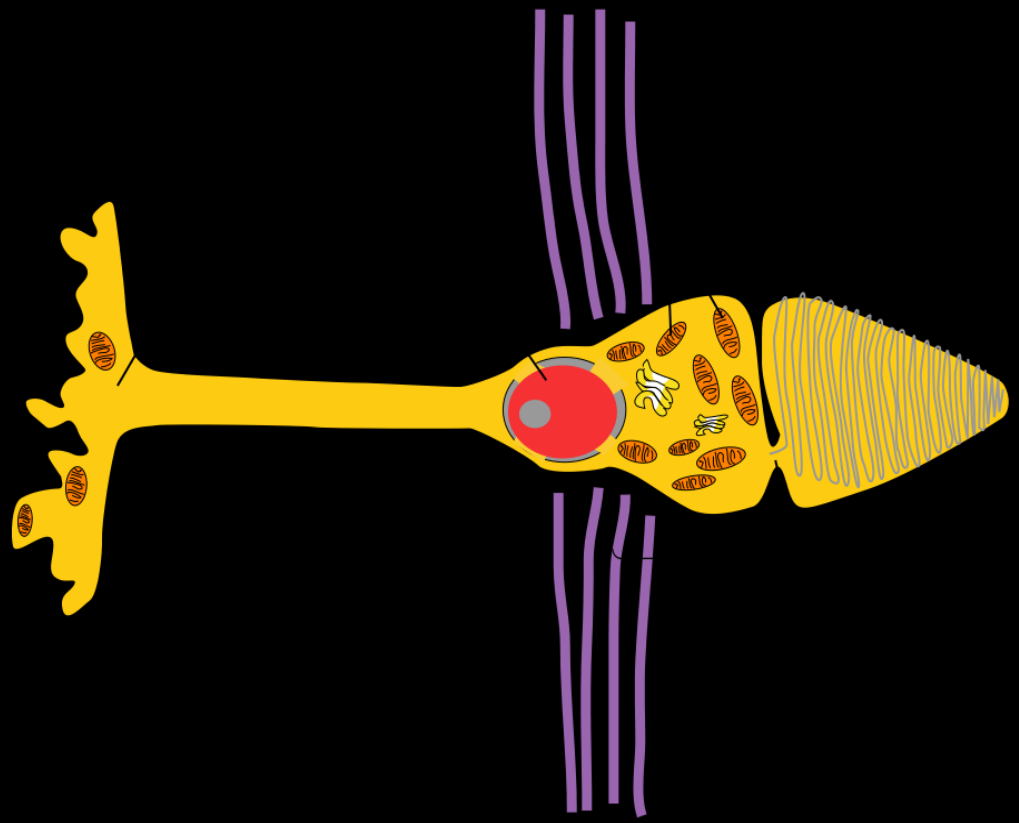
錐体(CONE)



- 錐体(cone)
  - 低感度
  - 3種類あり、色がわかる

By Madhero88 - 投稿者自身による作品, CC 表示-継承 3.0,
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6879296

錐体(CONE)



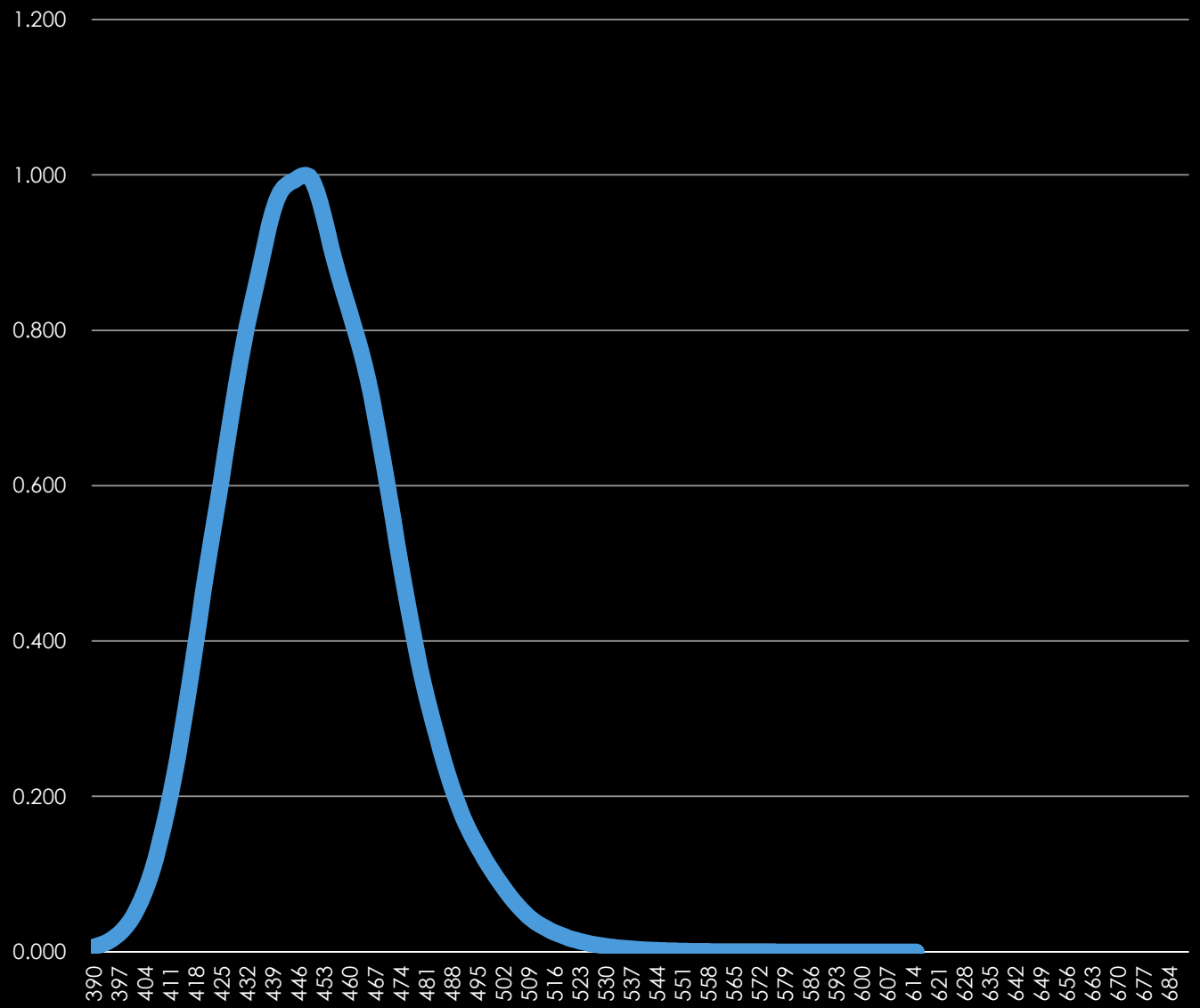
- Long
- Middle
- Short

- “L,M,S”錐体

By Madhero88 - 投稿者自身による作品, CC 表示-継承 3.0,
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6879296

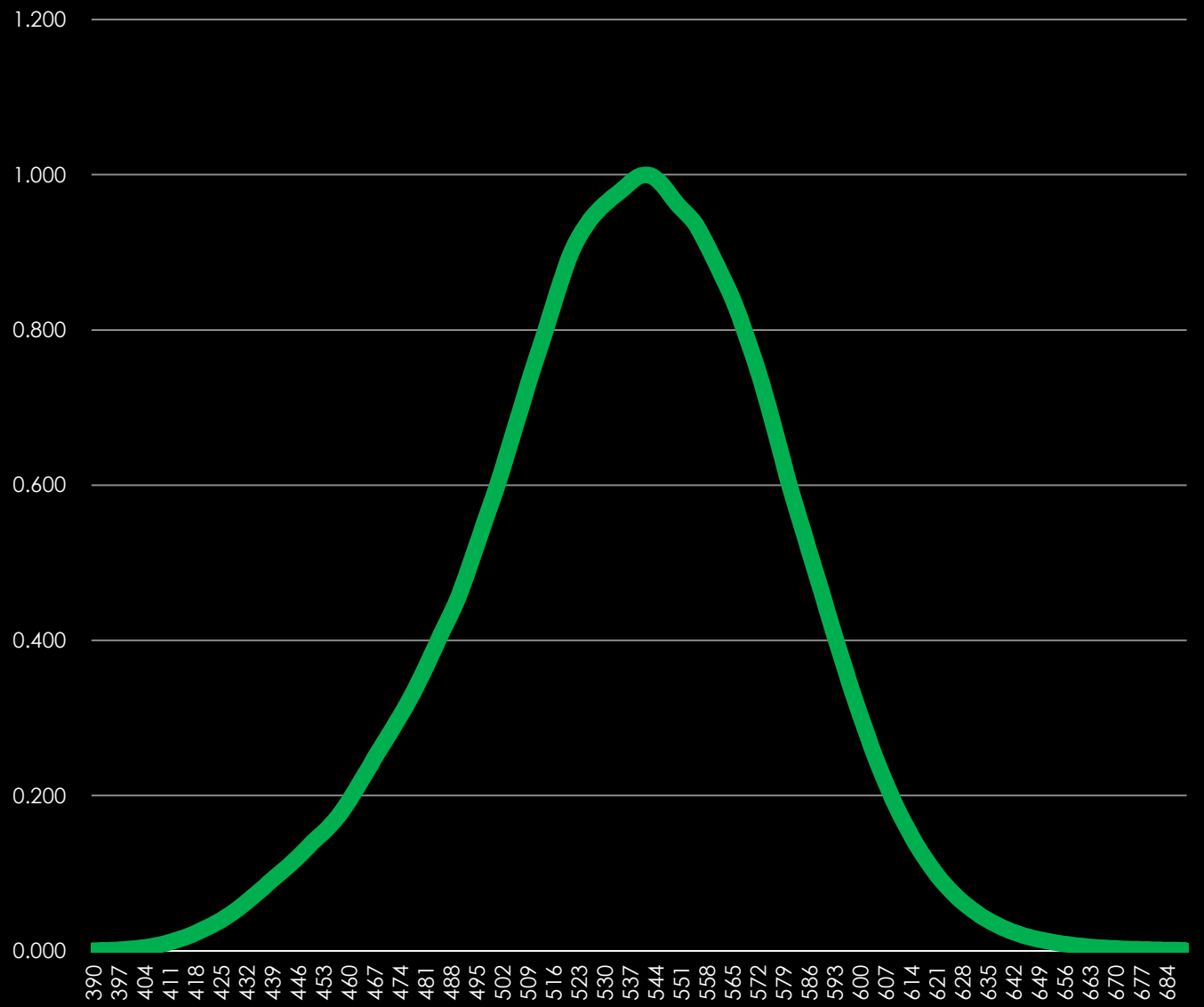
S錐体 分光感度

ピークが440nm付近
主に青を見分ける



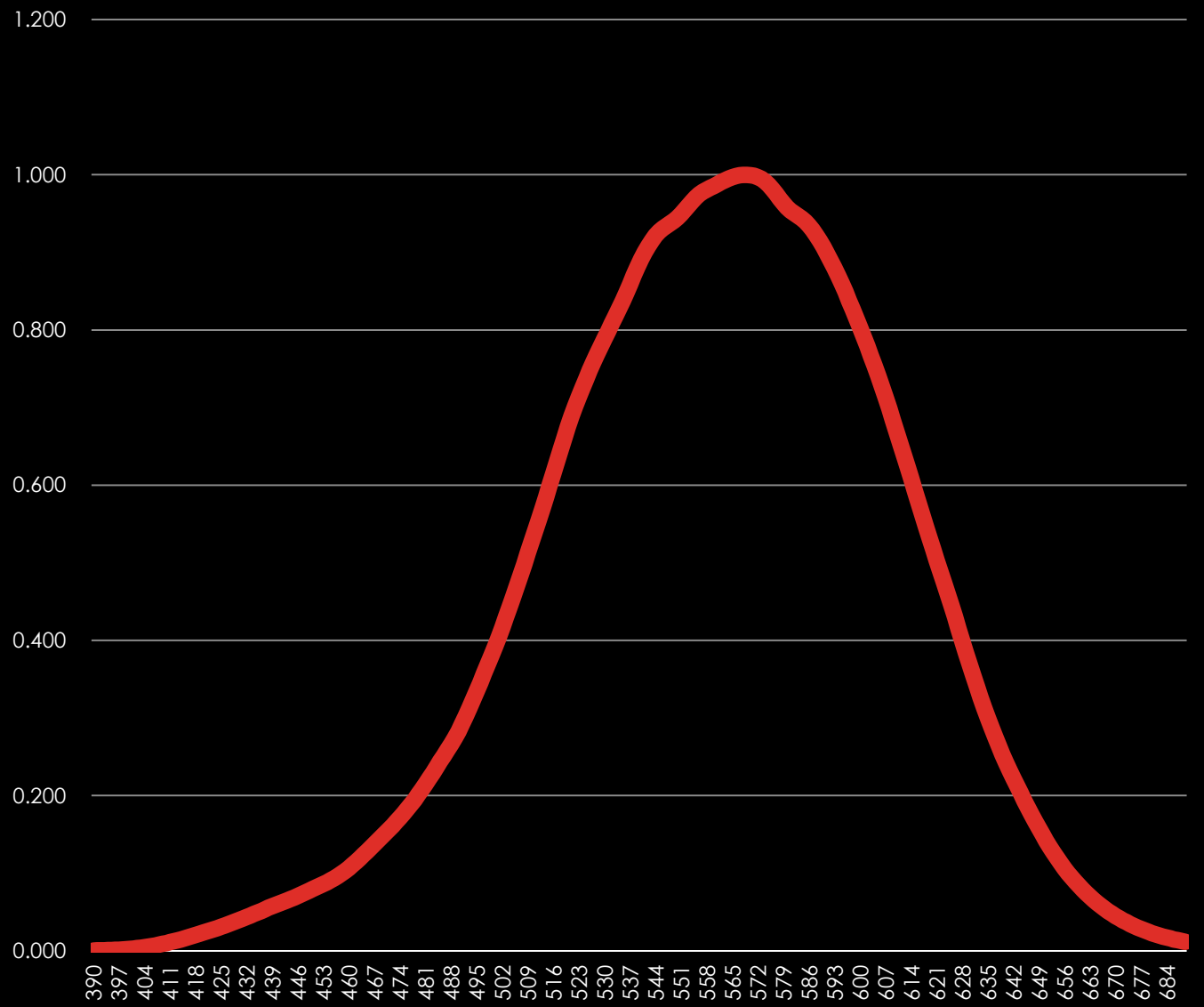
M錐体 分光感度

ピークが555nm付近
主に緑を見分ける



L錐体　分光感度

ピークは580nm付近
主に赤を見分ける

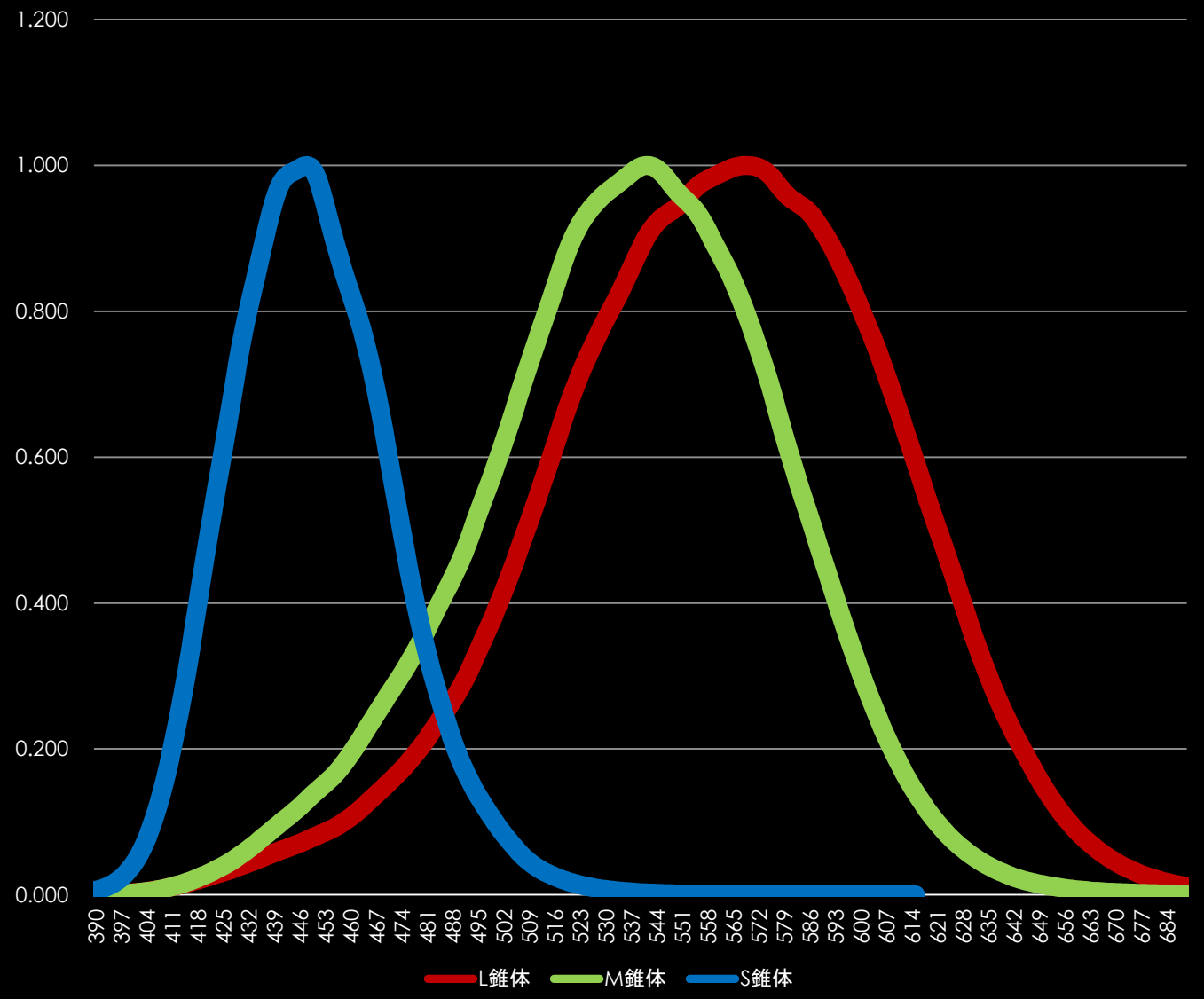


錐体分光感度

これを波長λの関数として

$$S(\lambda), M(\lambda), L(\lambda)$$

と表記する。

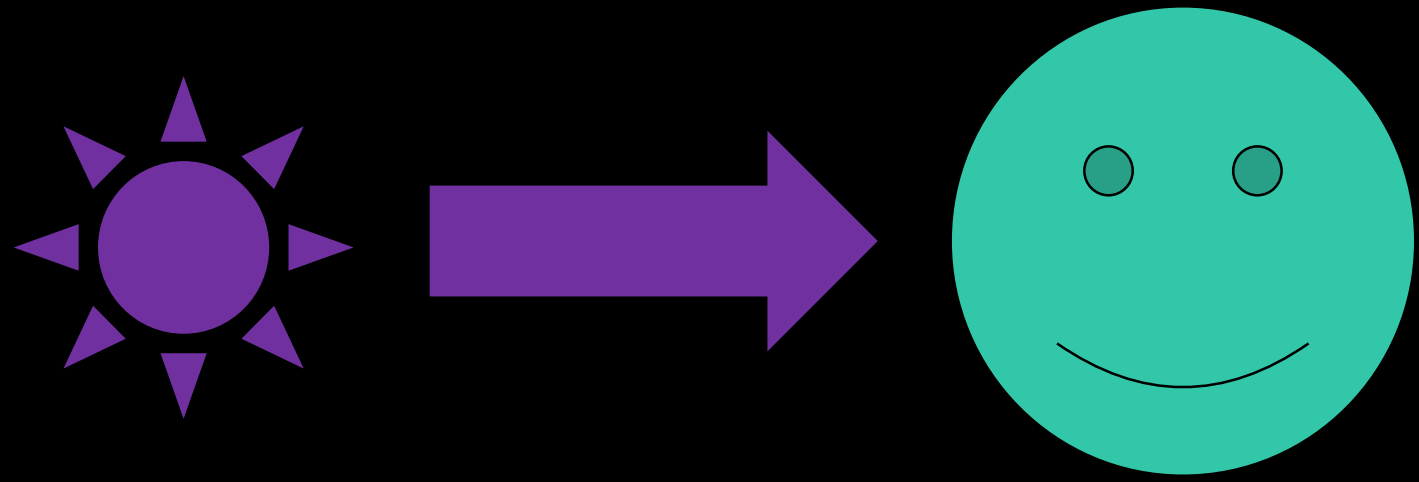


http://www.cvrl.org/cones.htm

なんで分光感度を使うの？

色を計測するため。

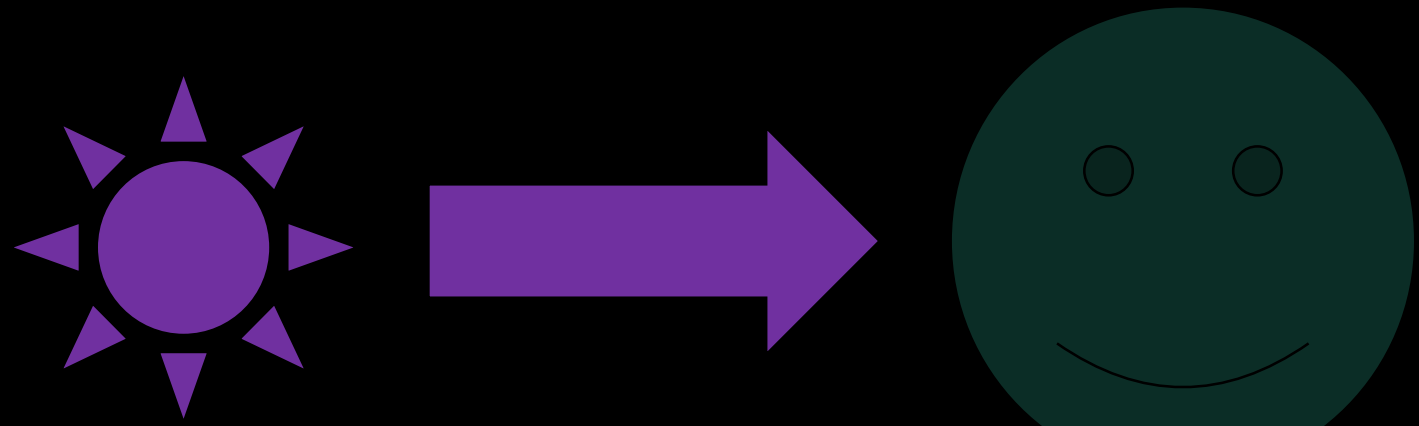
もっともシンプルなパターン



光源

ヒト視覚

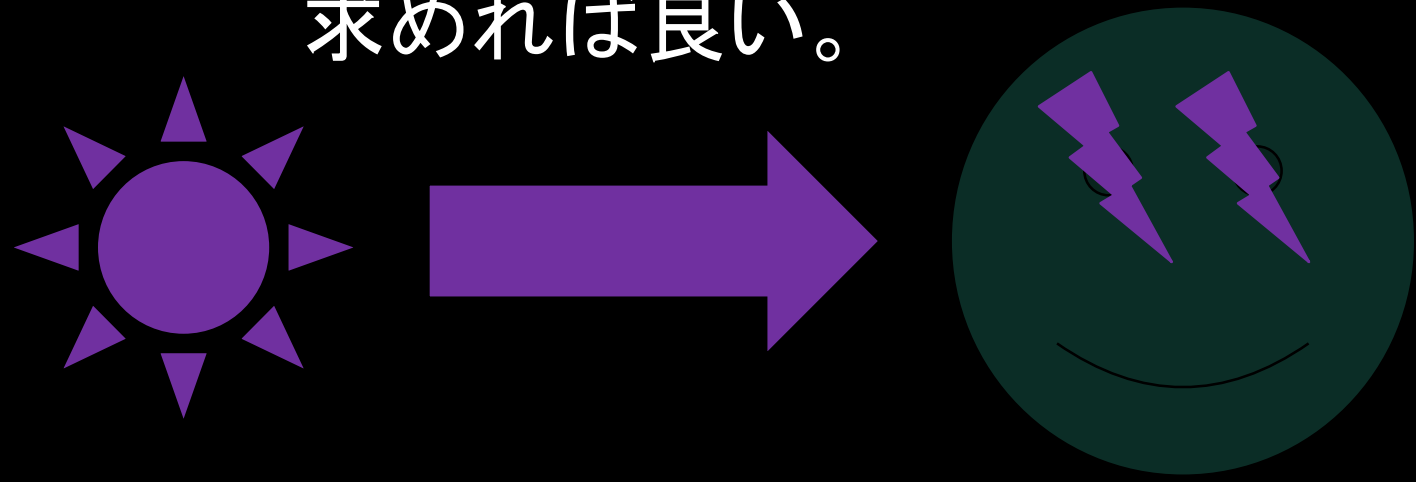
光の色を知りたい。



光源

ヒト視覚

錐体の刺激値を
求めれば良い。



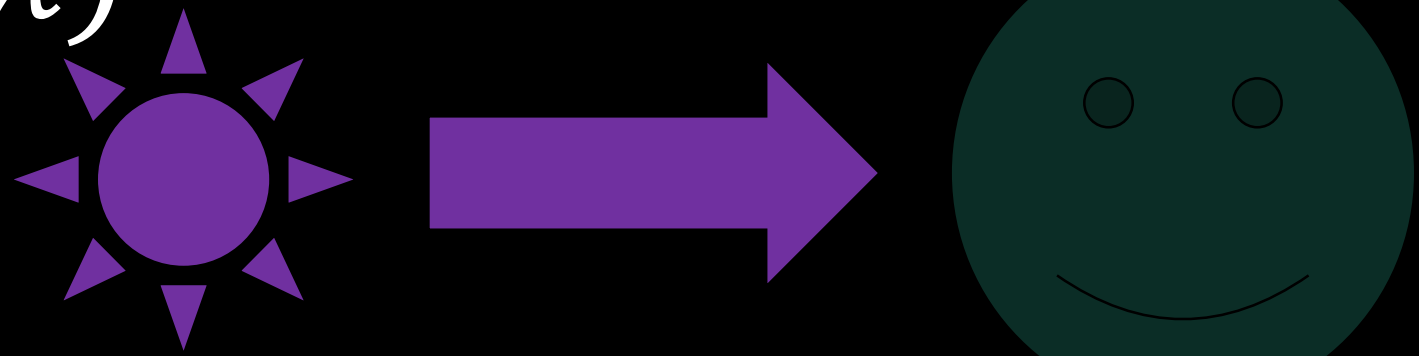
光源

ヒト視覚

光源からのスペクトルを

$$C(\lambda)$$

とすると

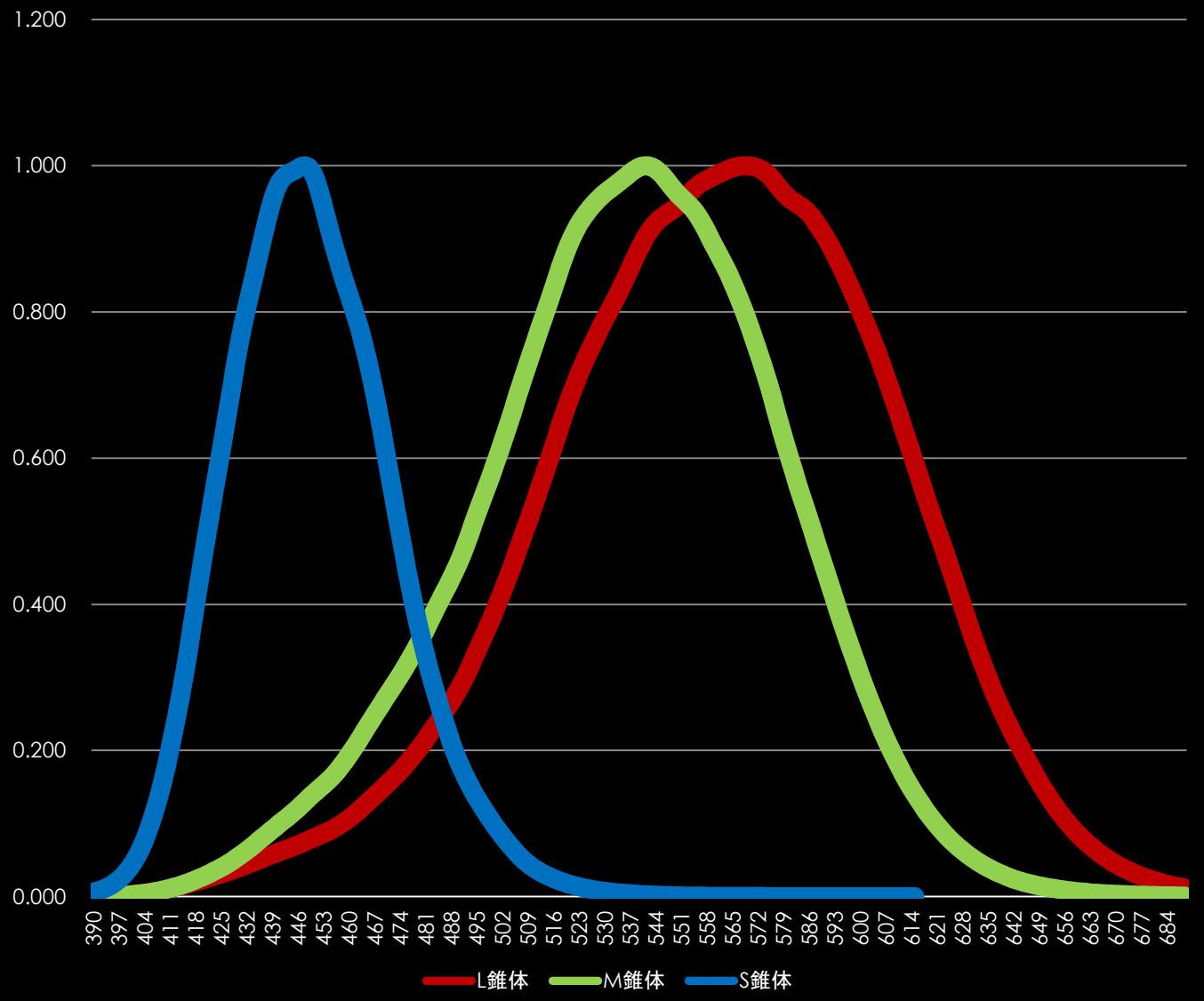


光源

ヒト視覚

錐体分光感度

$S(\lambda), M(\lambda), L(\lambda)$



http://www.cvrl.org/cones.htm

直接光の刺激値

$$L = \int C(\lambda)\, L(\lambda) d\lambda$$
$$M = \int C(\lambda)\, M(\lambda) d\lambda$$
$$S = \int C(\lambda)\, S(\lambda) d\lambda$$

光源

ヒト視覚

超シンプル。

どういうこと？

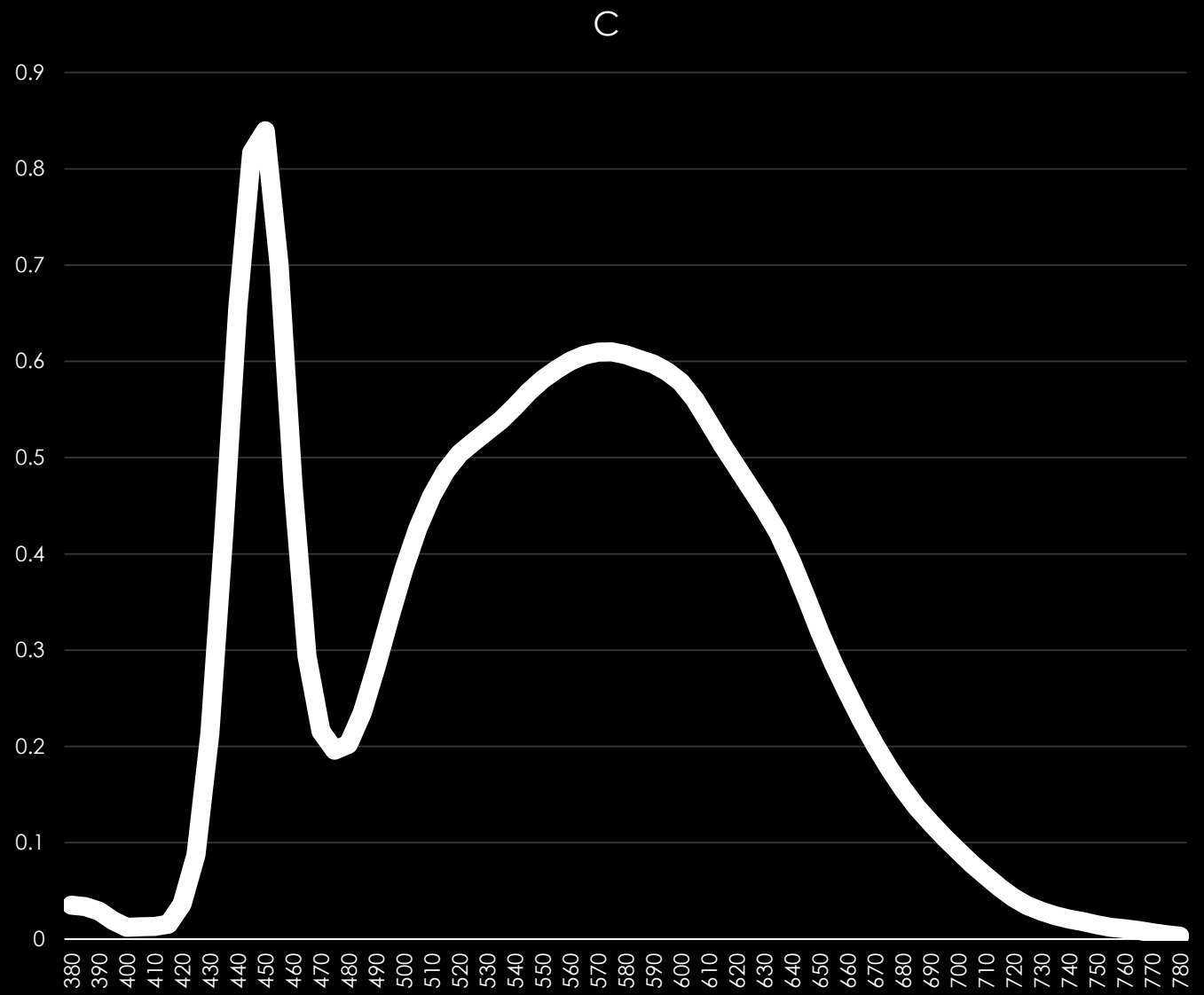
入力光 C(λ)

例。

LED蛍光灯

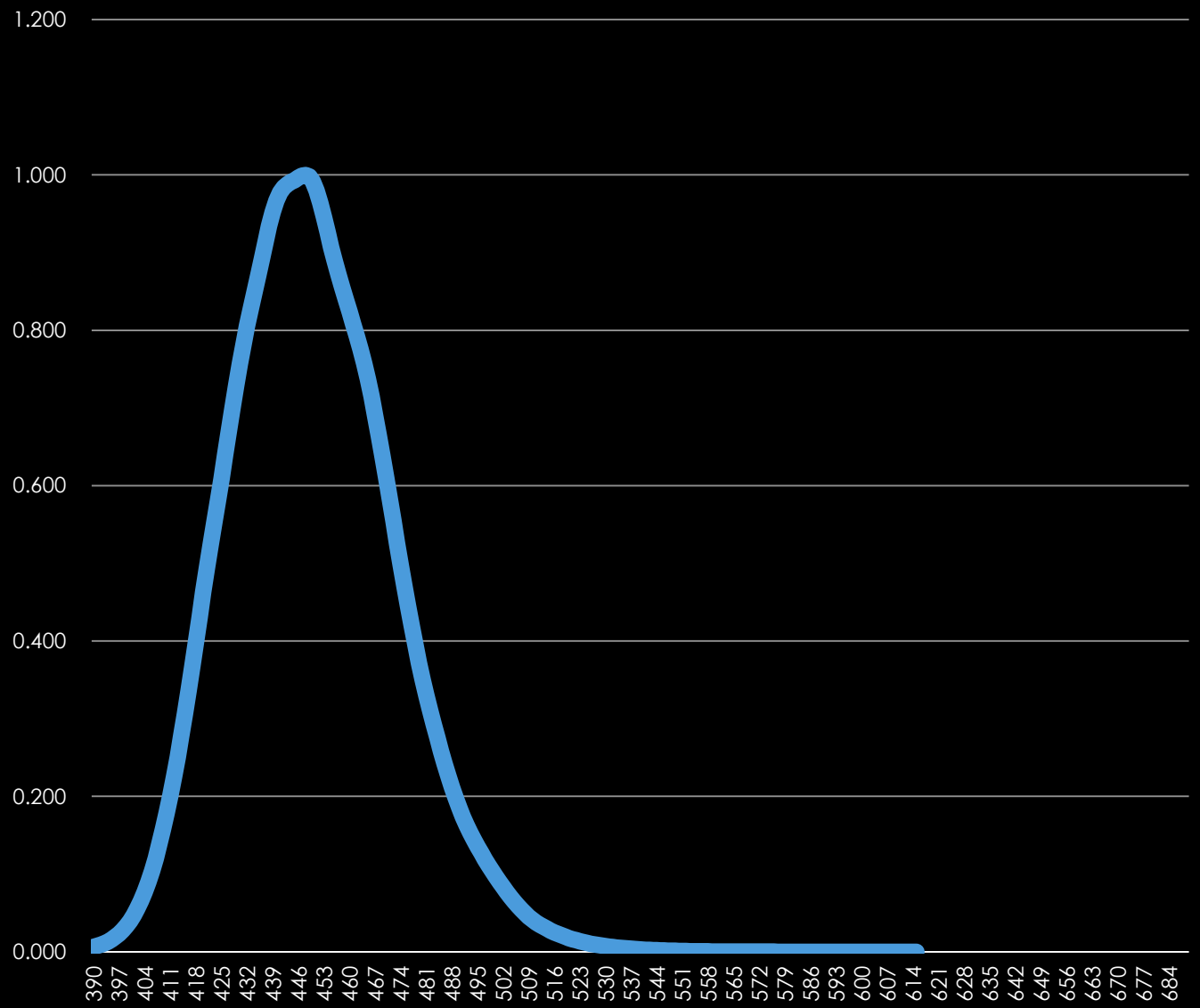
青＋黄で白色

縦軸は比エネルギー

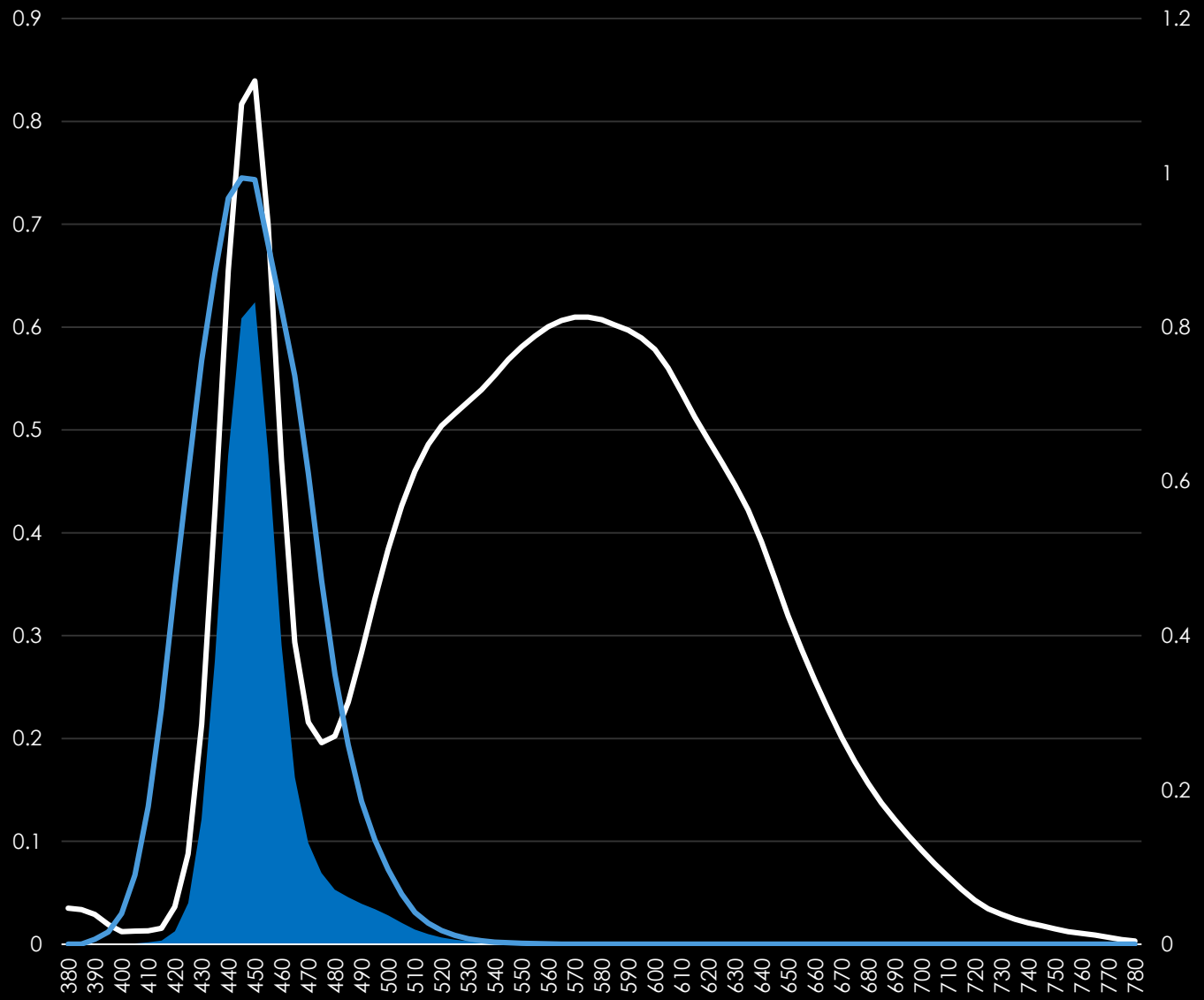


S錐体 分光感度

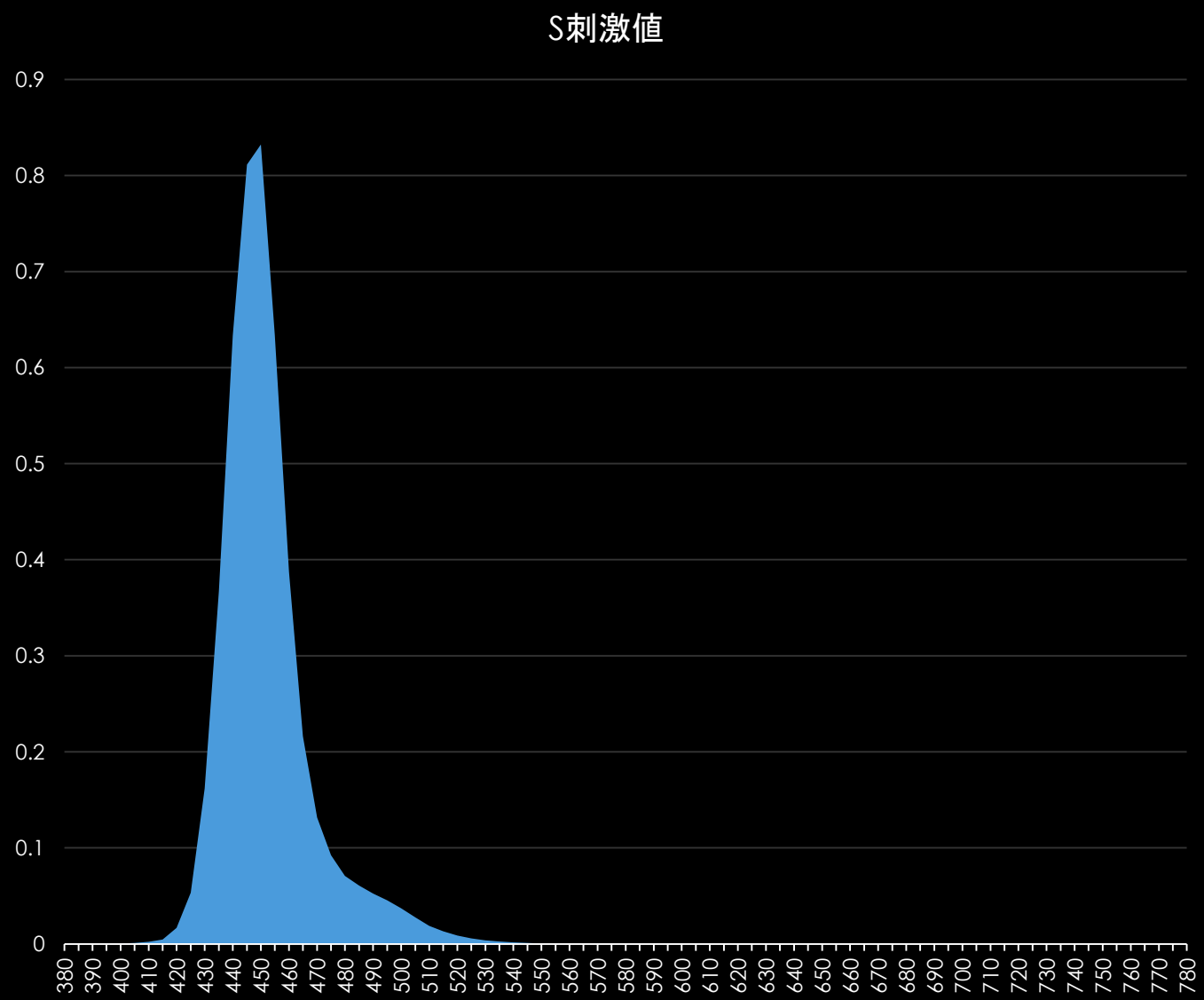
ピークが440nm付近
主に青を見分ける



入力光と感度を
掛け合わせると
刺激値が求まる。



刺激値 =
積分した面積

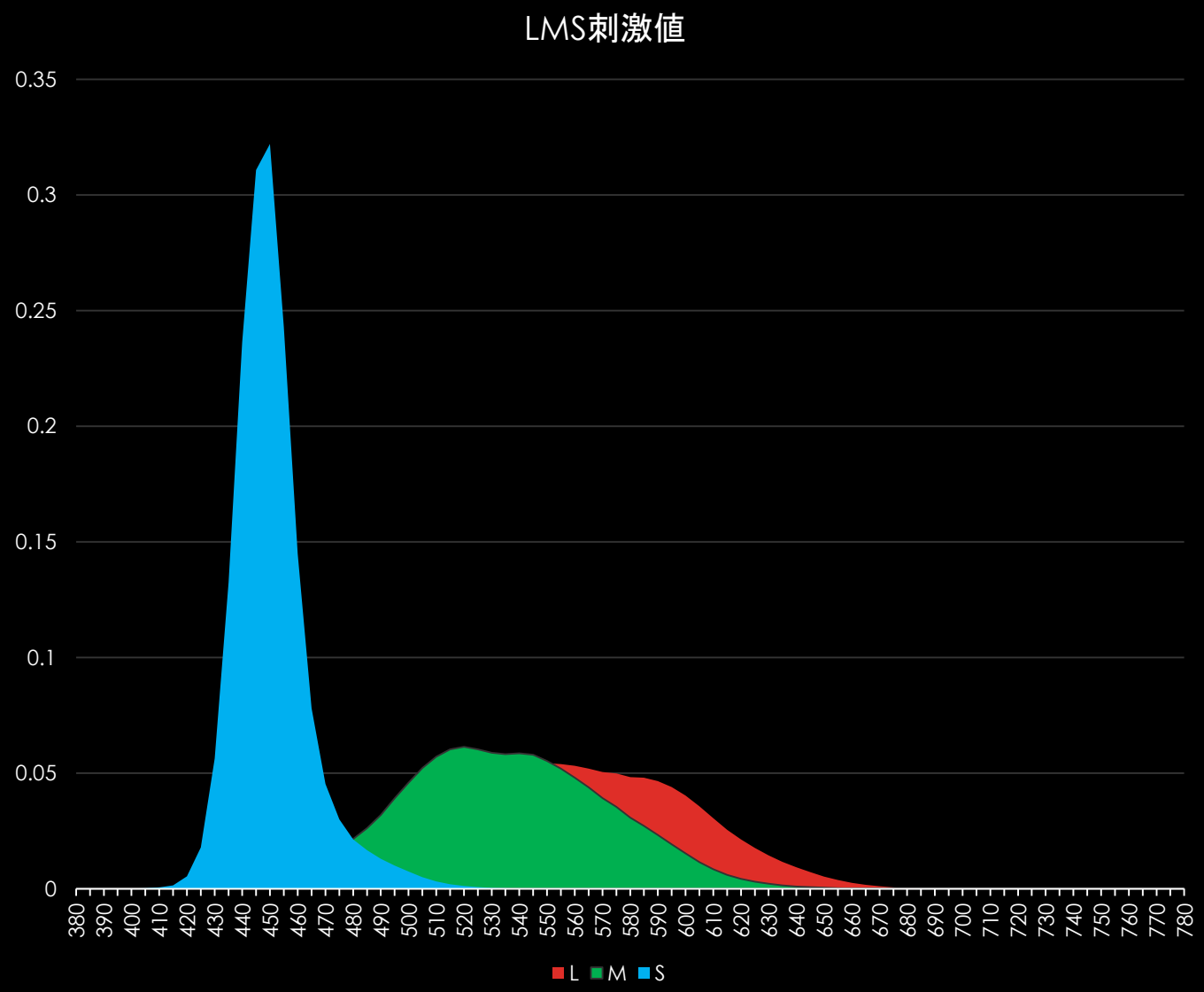

S刺激値
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
380
390
400
410
420
430
440
450
460
470
480
490
500
510
520
530
540
550
560
570
580
590
600
610
620
630
640
650
660
670
680
690
700
710
720
730
740
750
760
770
780

LMS全て同様に刺激値が求まる。

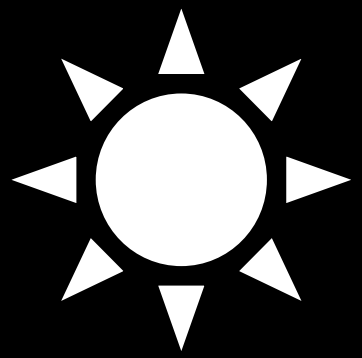
L 12.51718

M 10.40146

S 4.699071



物体の色の場合。



光源

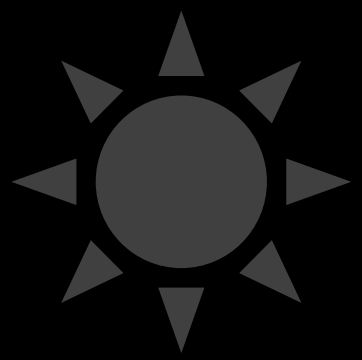
照明光

反射光

ヒト視覚

物体

この物体が何色に見えるか知りたい！



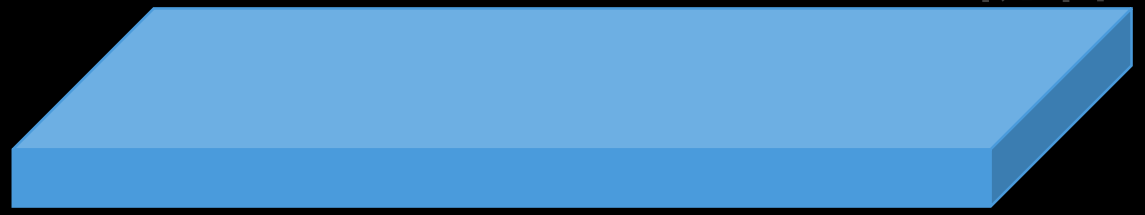
光源

照明光

反射光

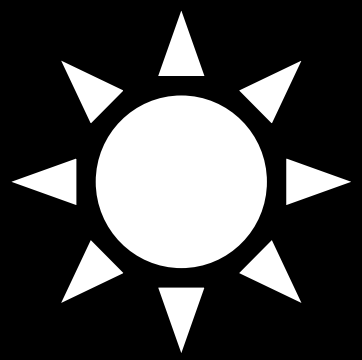
ヒト視覚

物体



光源からの光を

$C(\lambda)$



光源

照明光

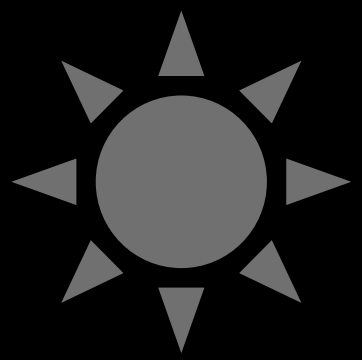
反射光

ヒト視覚

物体

物体の表面の分光反射率を

$R(\lambda)$



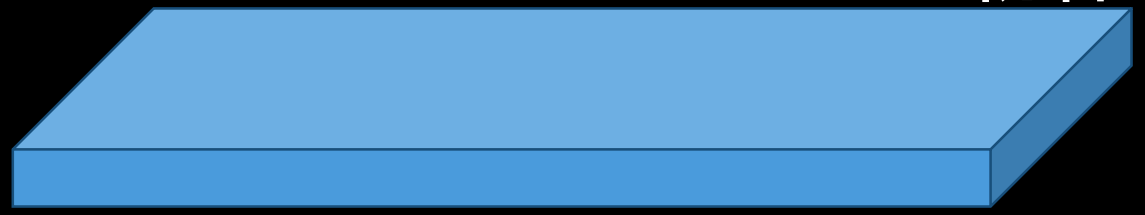
光源

照明光

反射光

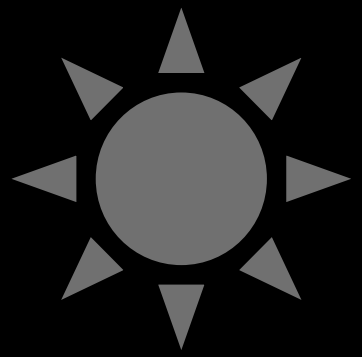
ヒト視覚

物体



反射光は

$$C(\lambda)R(\lambda)$$



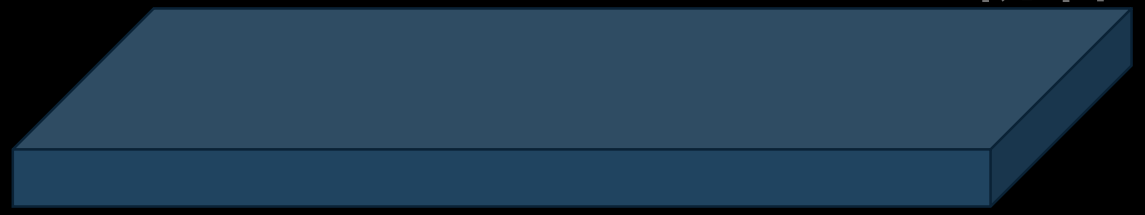
光源

照明光

反射光

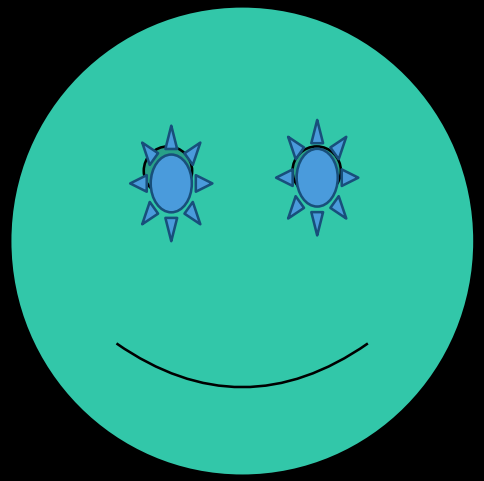
ヒト視覚

物体



照明光と反射率を元に

$$L = \int C(\lambda)R(\lambda)L(\lambda)d\lambda$$
$$M = \int C(\lambda)R(\lambda)M(\lambda)d\lambda$$
$$S = \int C(\lambda)R(\lambda)S(\lambda)d\lambda$$



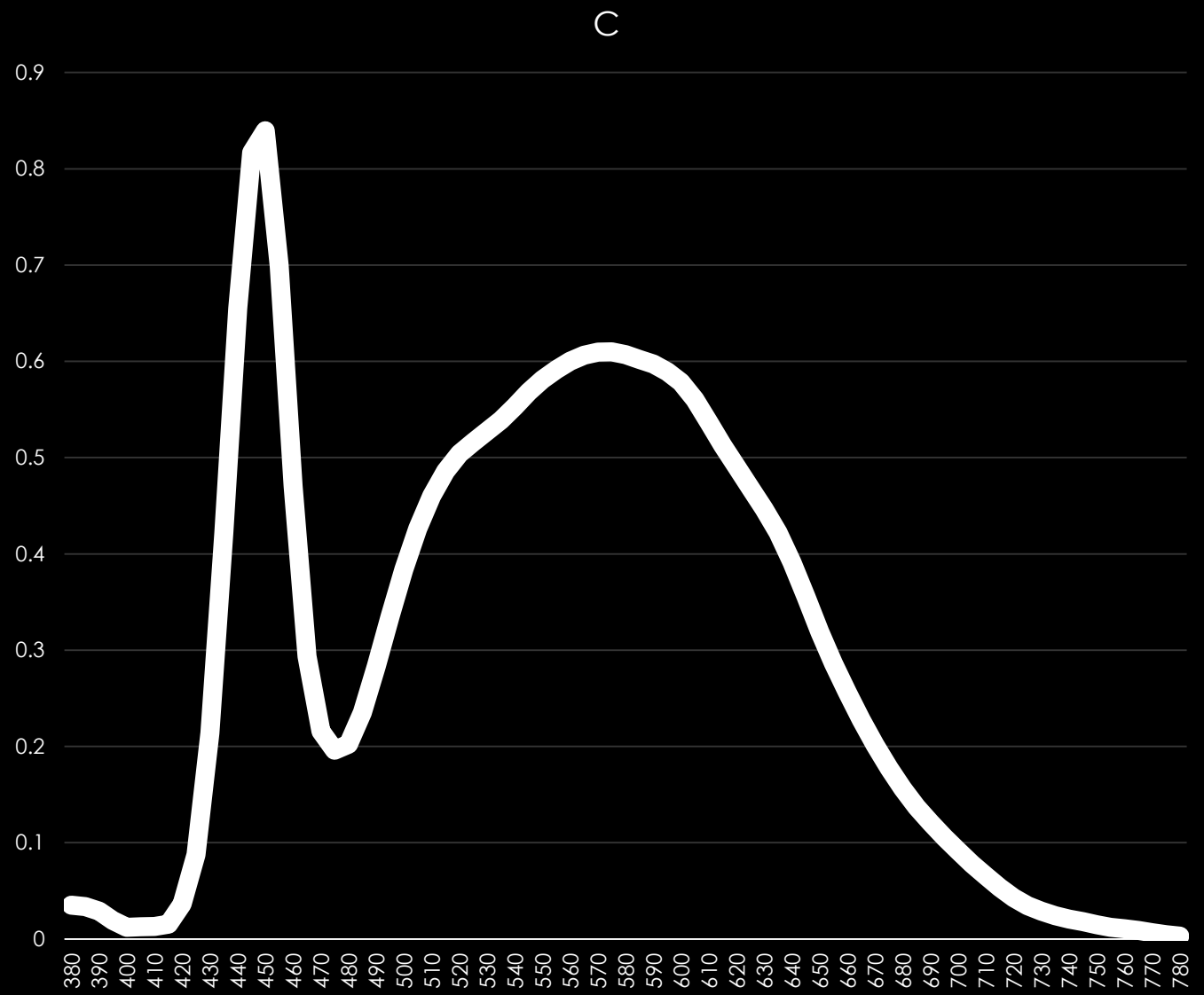
ヒト視覚

として刺激値(=色)が求まる。

順を追って見てみよう

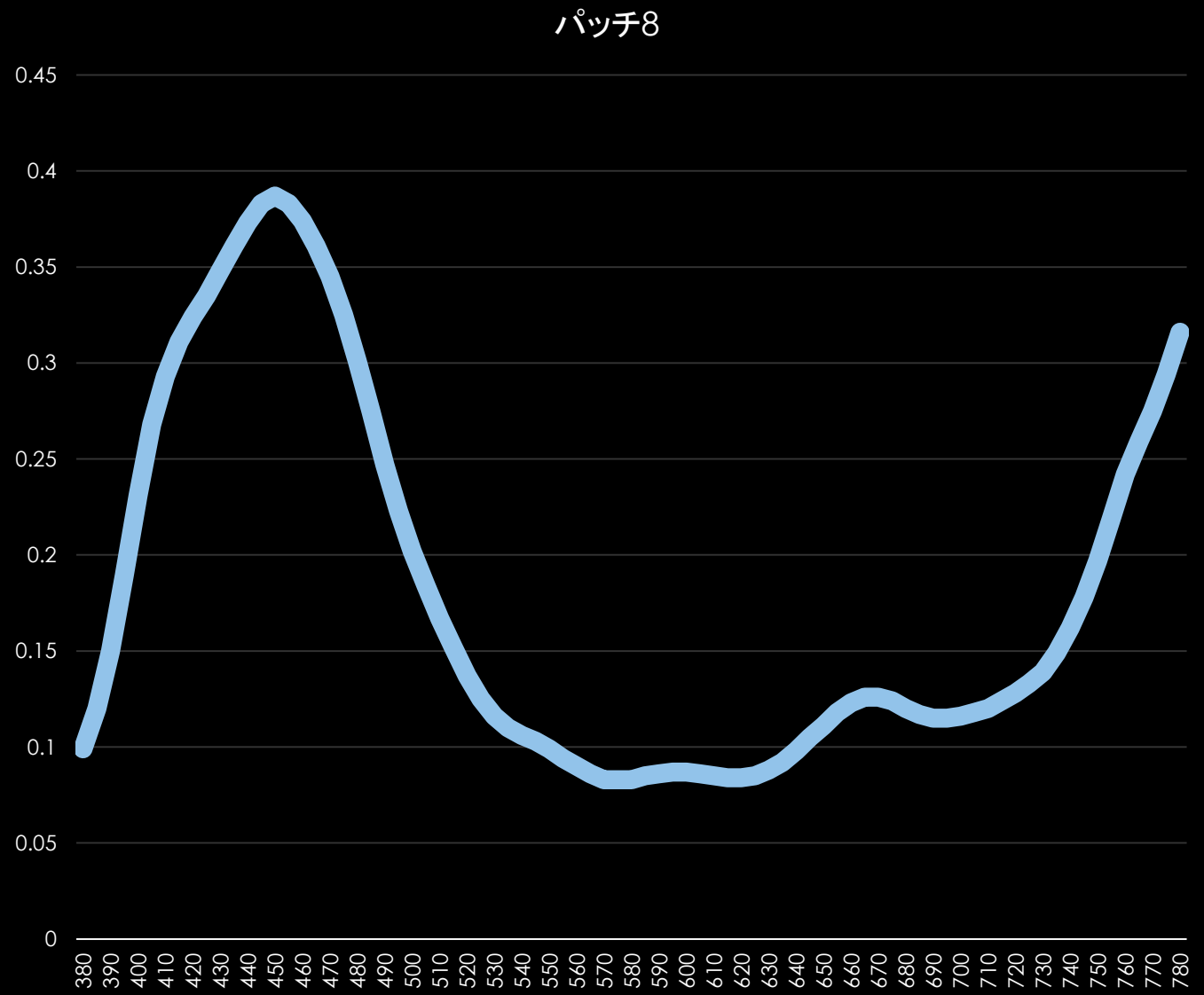
入力光 C(λ)

激安白色LED

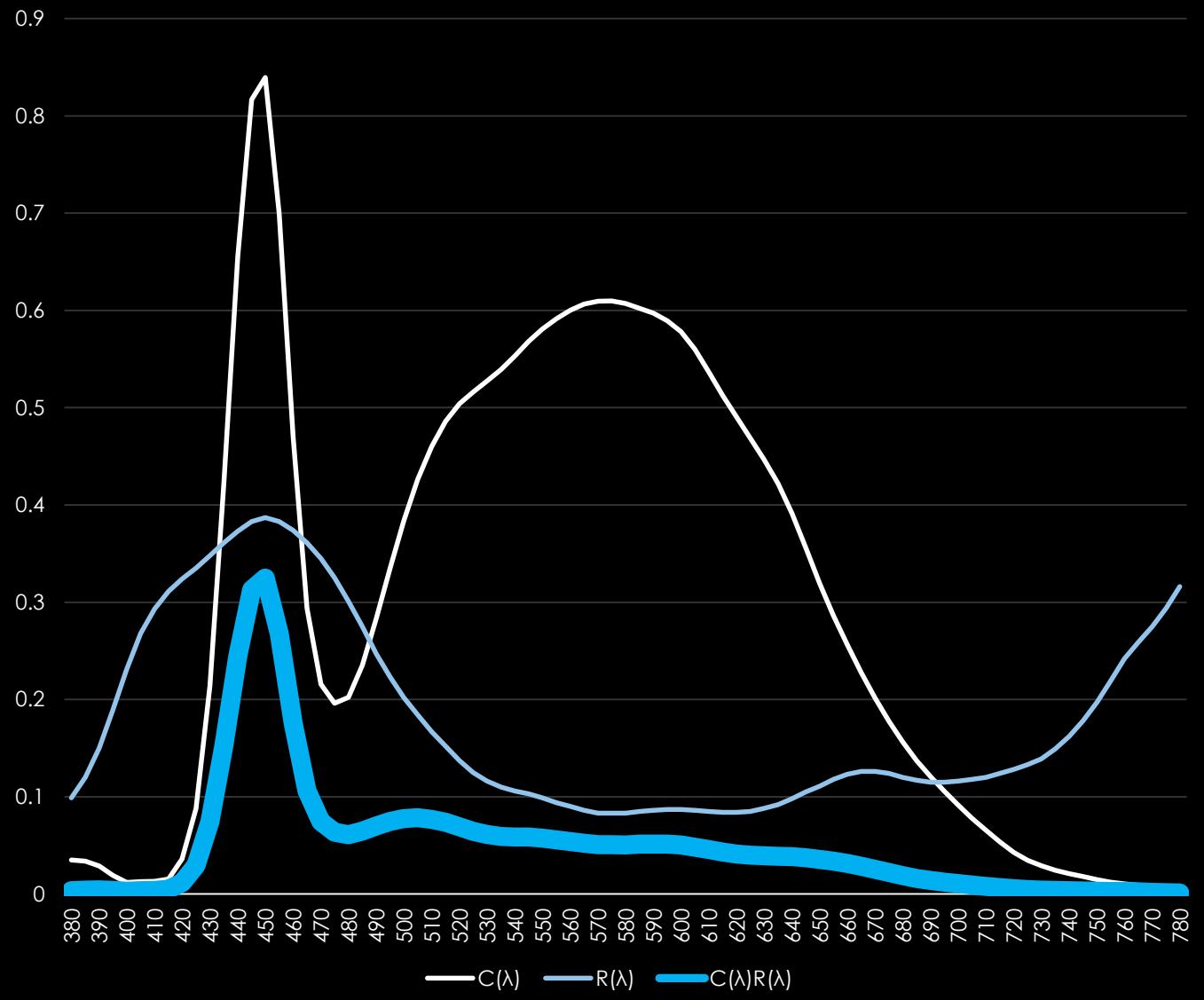


分光反射率 R(λ)

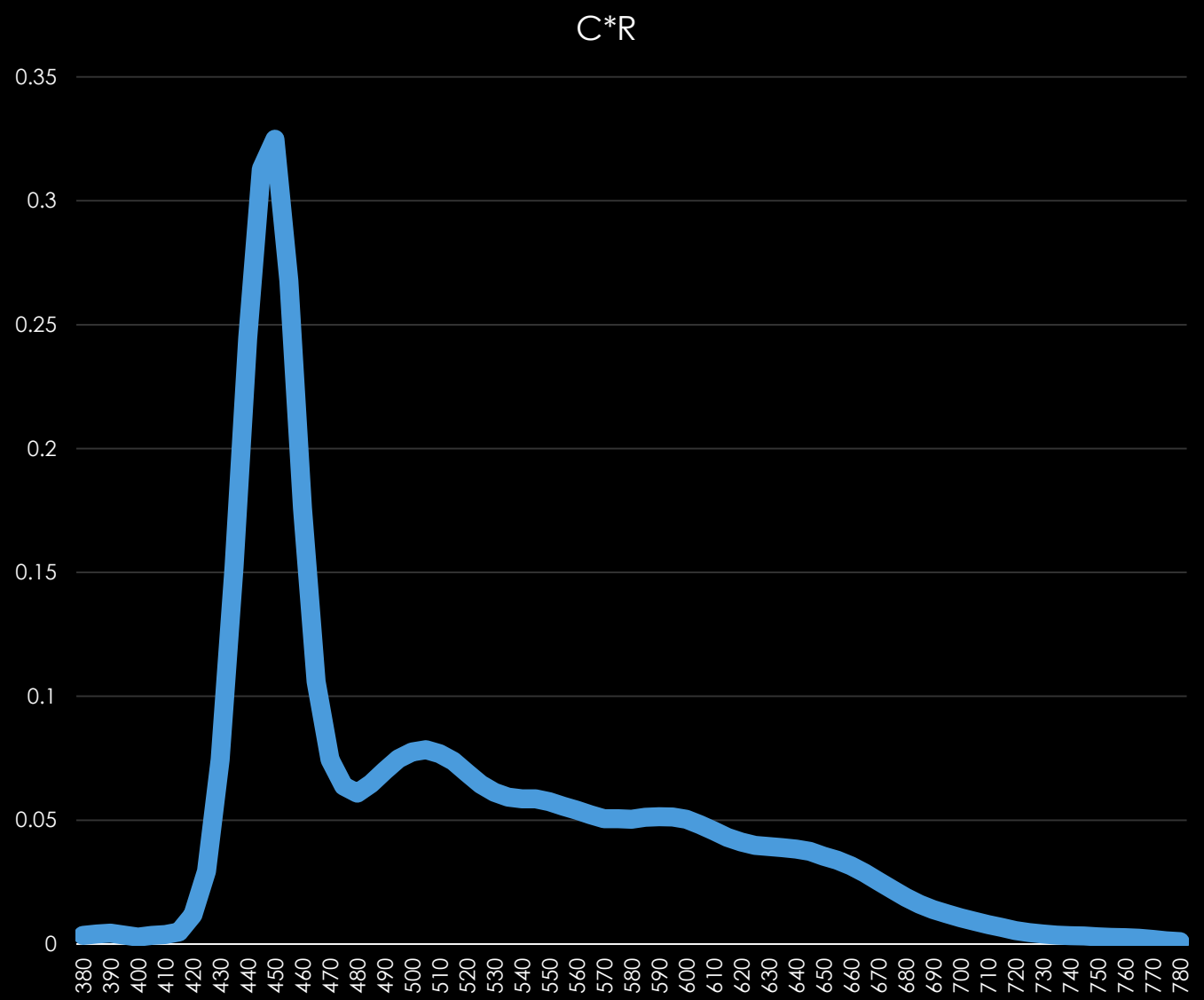
マクベスチャート8番(水色)



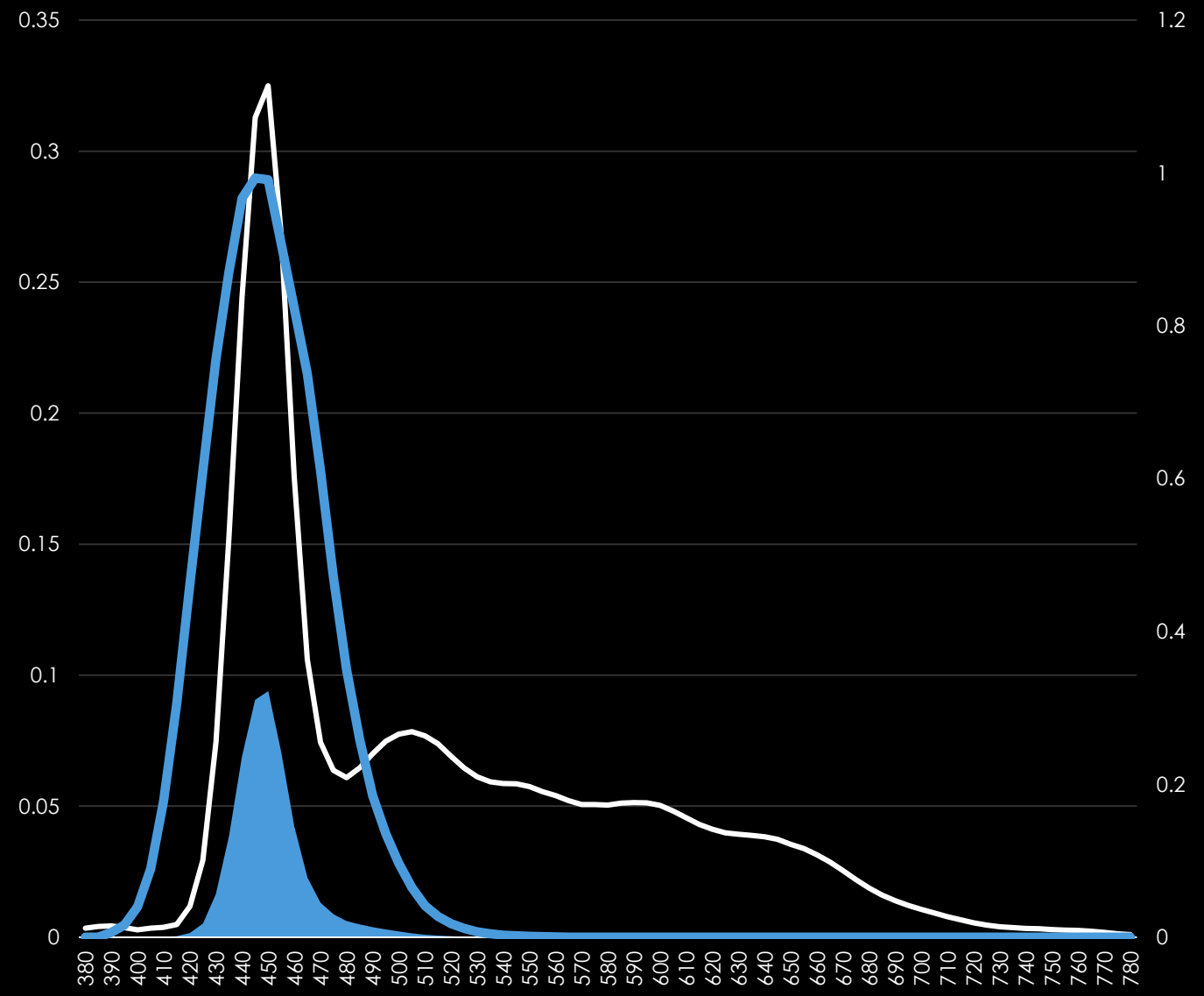
反射光のスペクトルは光源＊反射率



反射光 C(λ)*R(λ)

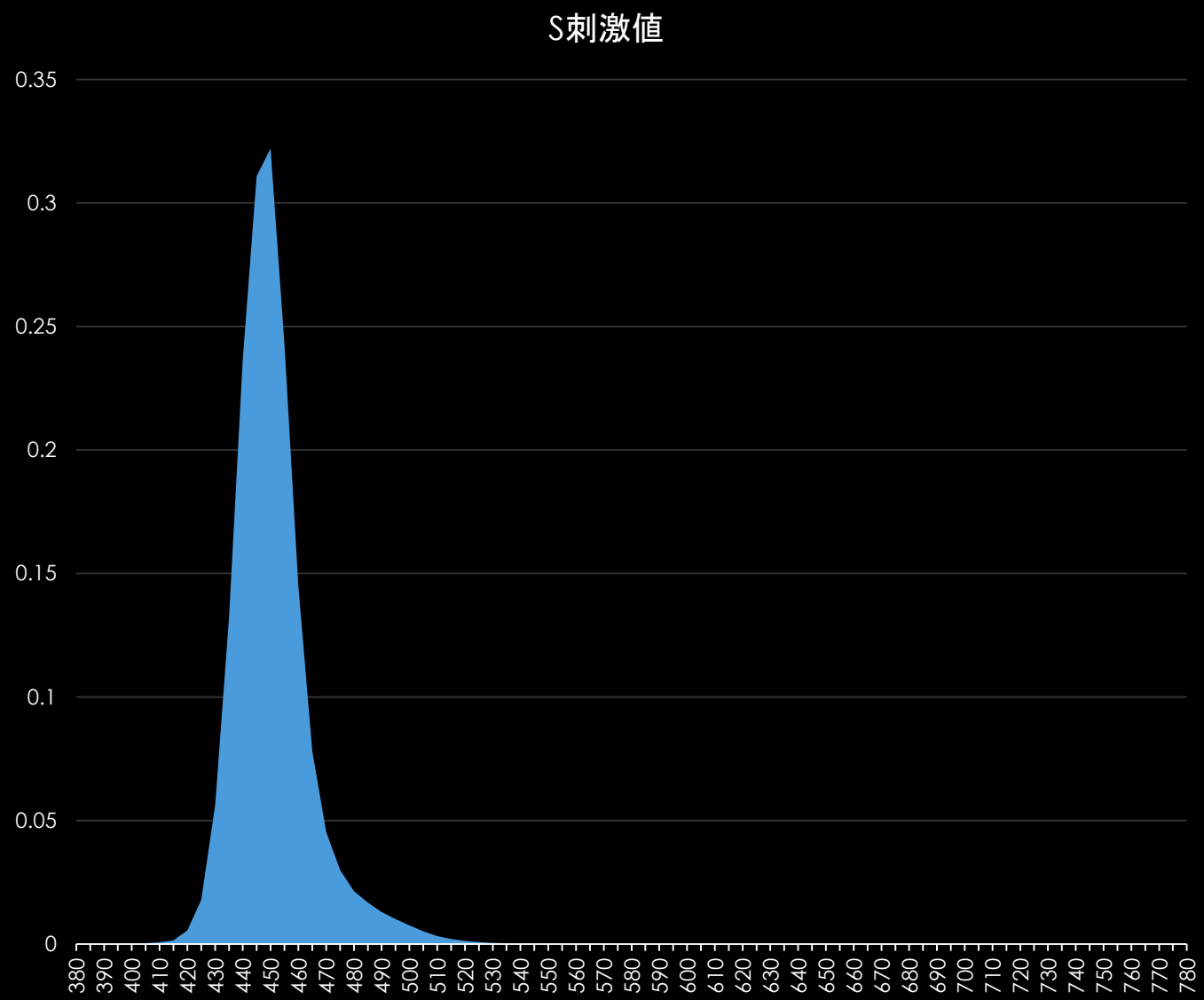

C*R
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
380
390
400
410
420
430
440
450
460
470
480
490
500
510
520
530
540
550
560
570
580
590
600
610
620
630
640
650
660
670
680
690
700
710
720
730
740
750
760
770
780

さらにS錐体の
分光感度をかけて

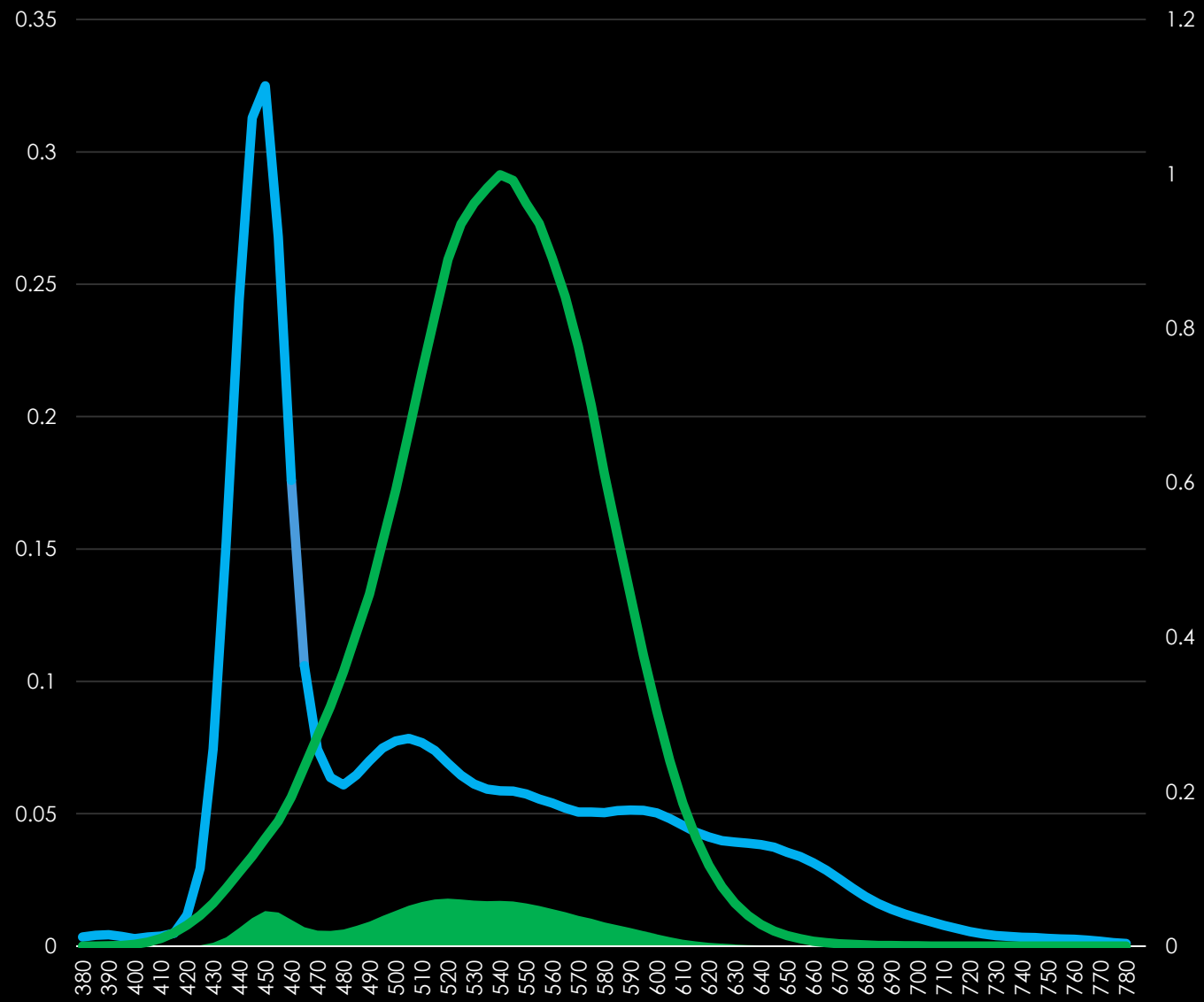


積分する。
面積がS錐体刺激値。

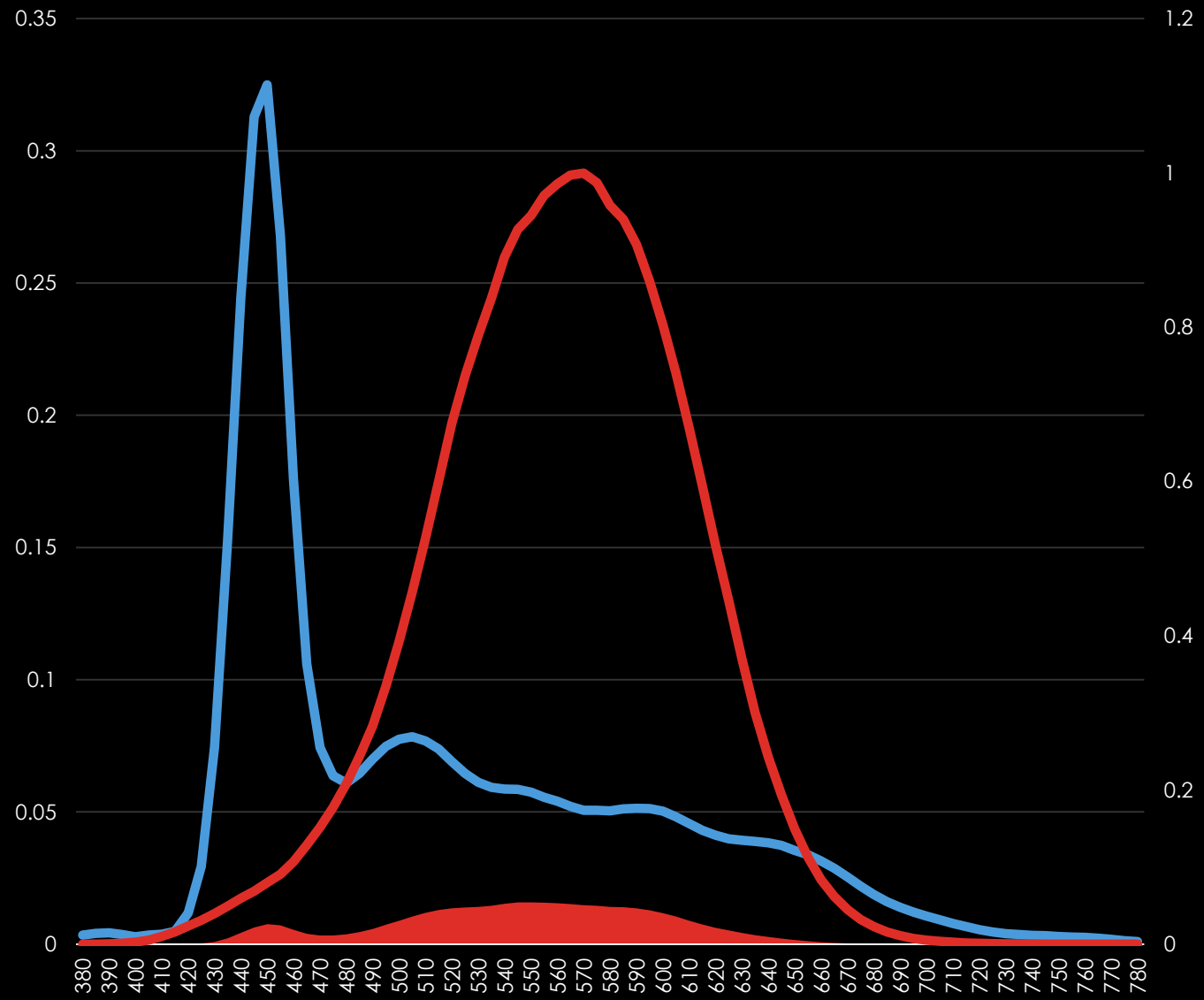
1.70725



同様にM錐体


0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
380 390 400 410 420 430 440 450 460 470 480 490 500 510 520 530 540 550 560 570 580 590 600 610 620 630 640 650 660 670 680 690 700 710 720 730 740 750 760 770 780

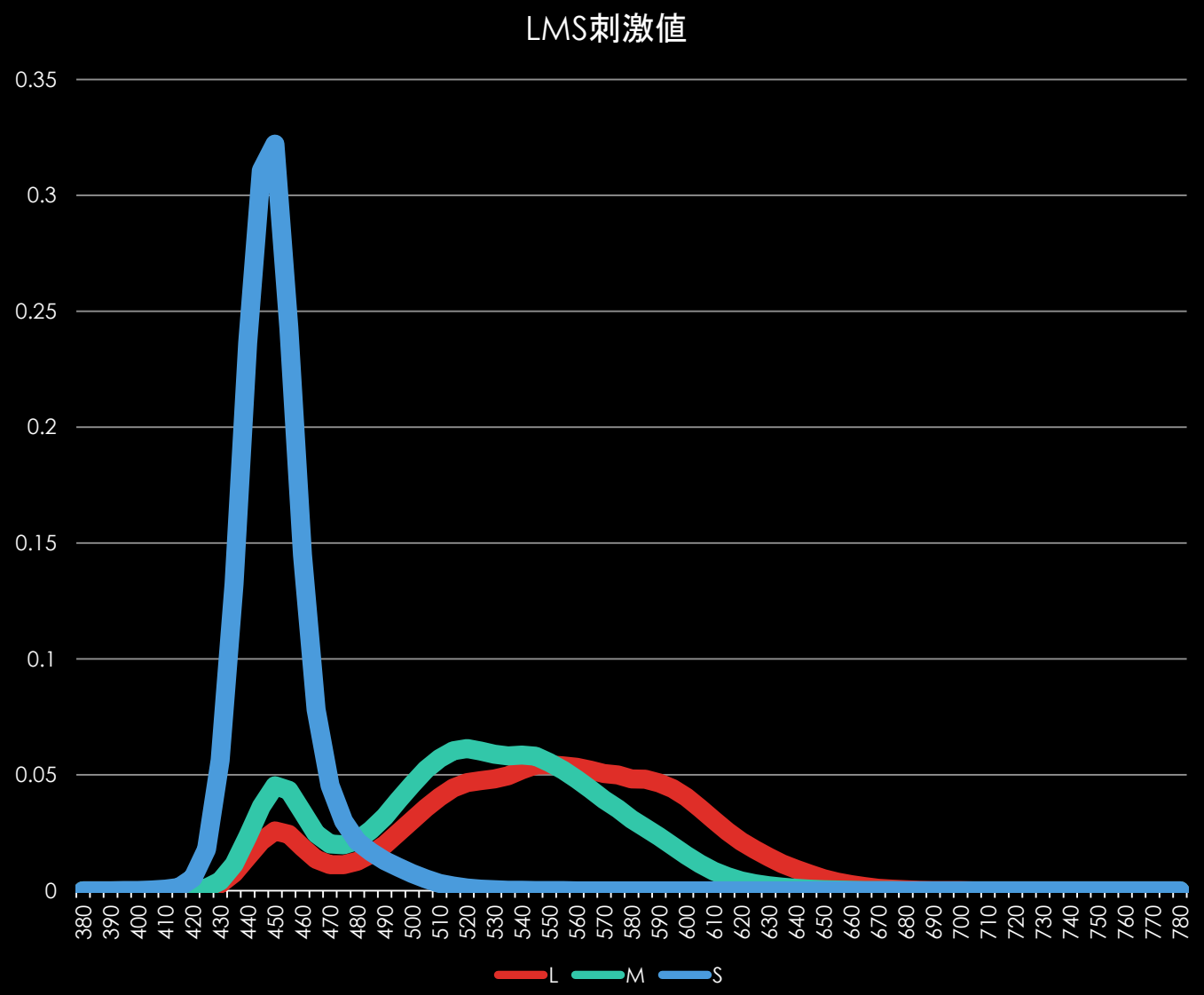
同様にL錐体


0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
380 390 400 410 420 430 440 450 460 470 480 490 500 510 520 530 540 550 560 570 580 590 600 610 620 630 640 650 660 670 680 690 700 710 720 730 740 750 760 770 780

LMS刺激値が求まった。

L ： 1.407073
M ： 1.384366
S ： 1.70725

Sが大きい。
つまり、青い。



色をベクトルで表す

- 錐体は L,M,S の3種類。
- 3刺激値のバランスが色。
- そこで、ある色を、3次元のベクトルで表記する。

$$\boldsymbol{C}(r, g, b)$$

等色

- 等色：同じ色に見えること
- ある2色 C_1, C_2 が等色であることを

$$C_1 = C_2$$

と表記する。

色は線形性を満たす

- 「グラスマンの法則」
  - 比較則：$\boldsymbol{C_1 = C_2}$ ならば $K\boldsymbol{C_1} = K\boldsymbol{C_2}$
  - 加法則：$\boldsymbol{C_1 = C_2}$ かつ $\boldsymbol{C_3 = C_4}$ のとき
    $\boldsymbol{C_1 + C_3 = C_2 + C_4}$
- 色は掛け算と足し算ができるよ、ということ。

まとめ

- 物体色 = 光 * 反射率 * 観察者
- 光源色 = 光 * 観察者
- 色は、3次元のベクトルで表せる。
- 色は、線形性がある。

観察者の分光感度さえわかれば色が計算できる。

人間の平均的な分光感度を求めよう！

全員共通の「色」の話ができるようになる。

3.標準観察者を求める

標準観察者を求める･･･どうやって？

網膜は取り出せない

分光感度を求めること

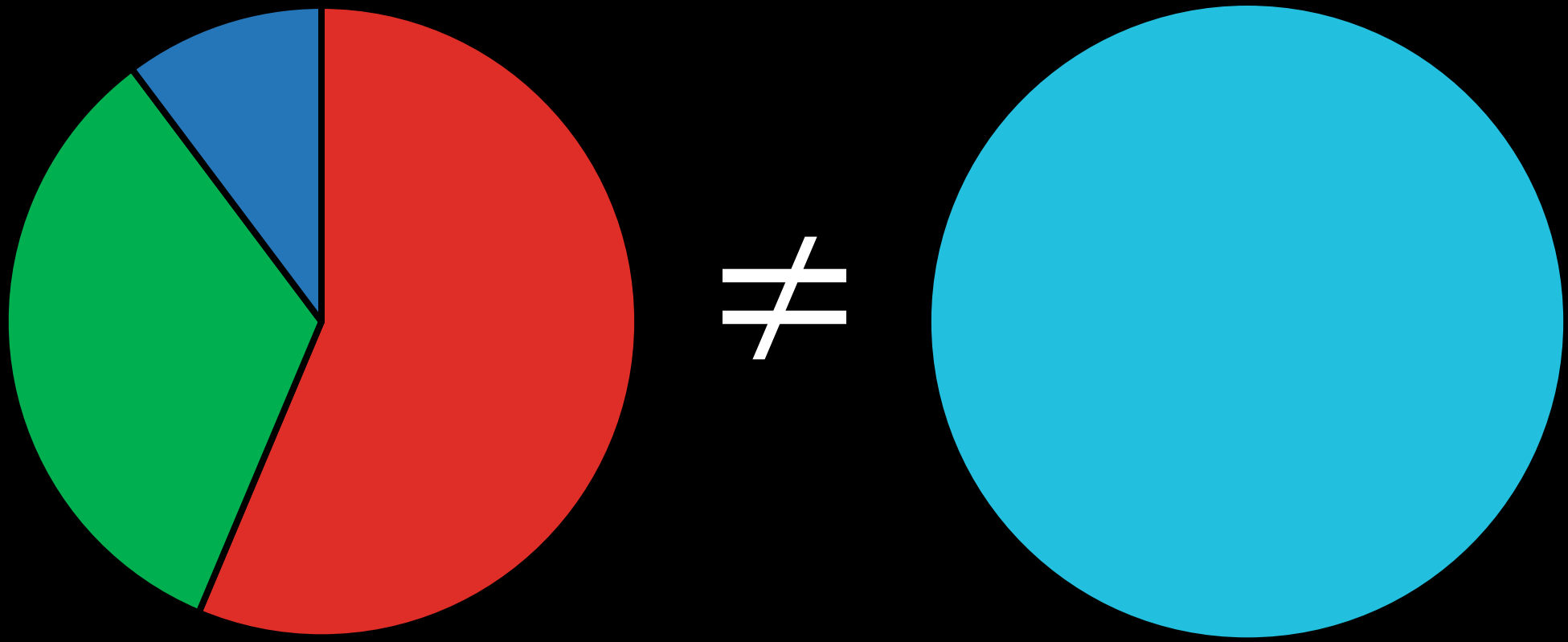
＝

特定波長の単色光が何色に見えるか

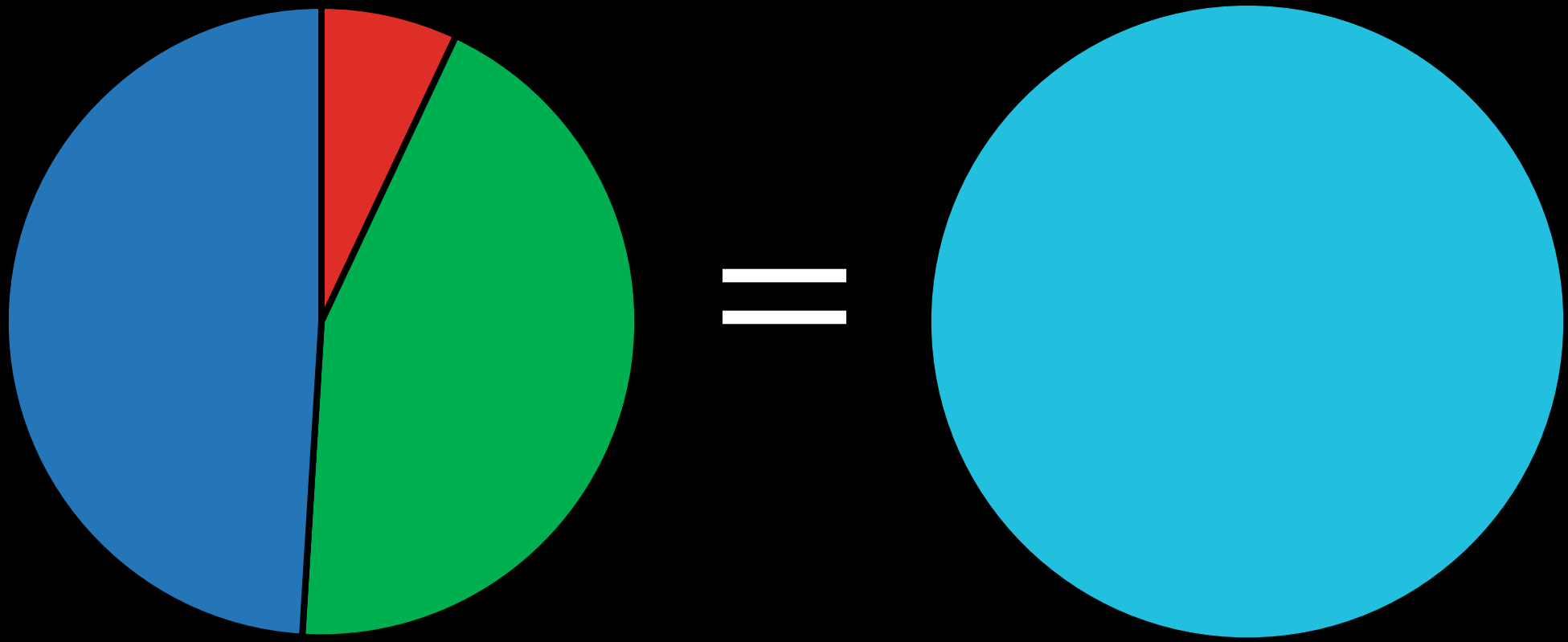
等色実験

- 3原色を用意する。
- 3原色のバランスを変化させて、
  対象光と同じに見えるかどうか試す。

調整前



調整後

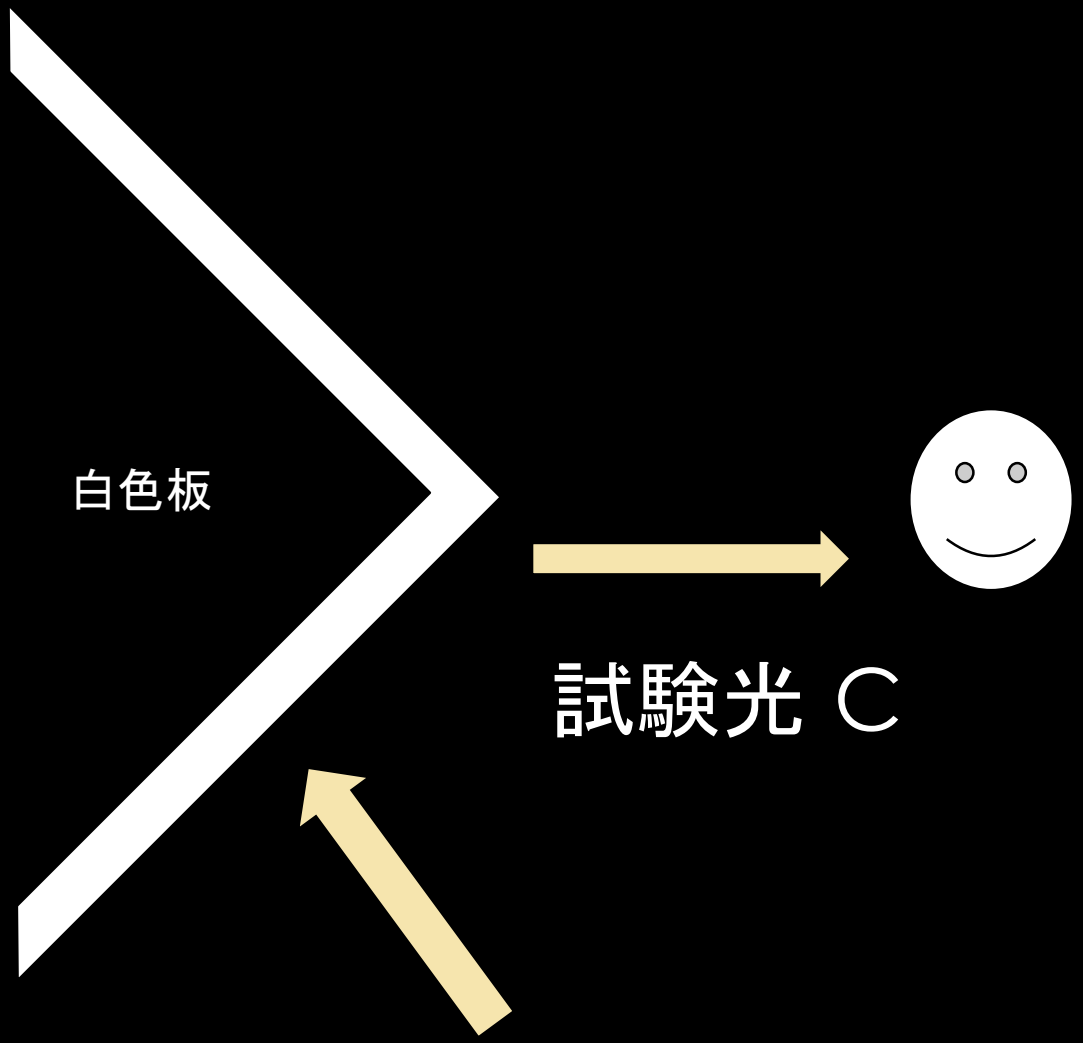


実際にはもっと複雑

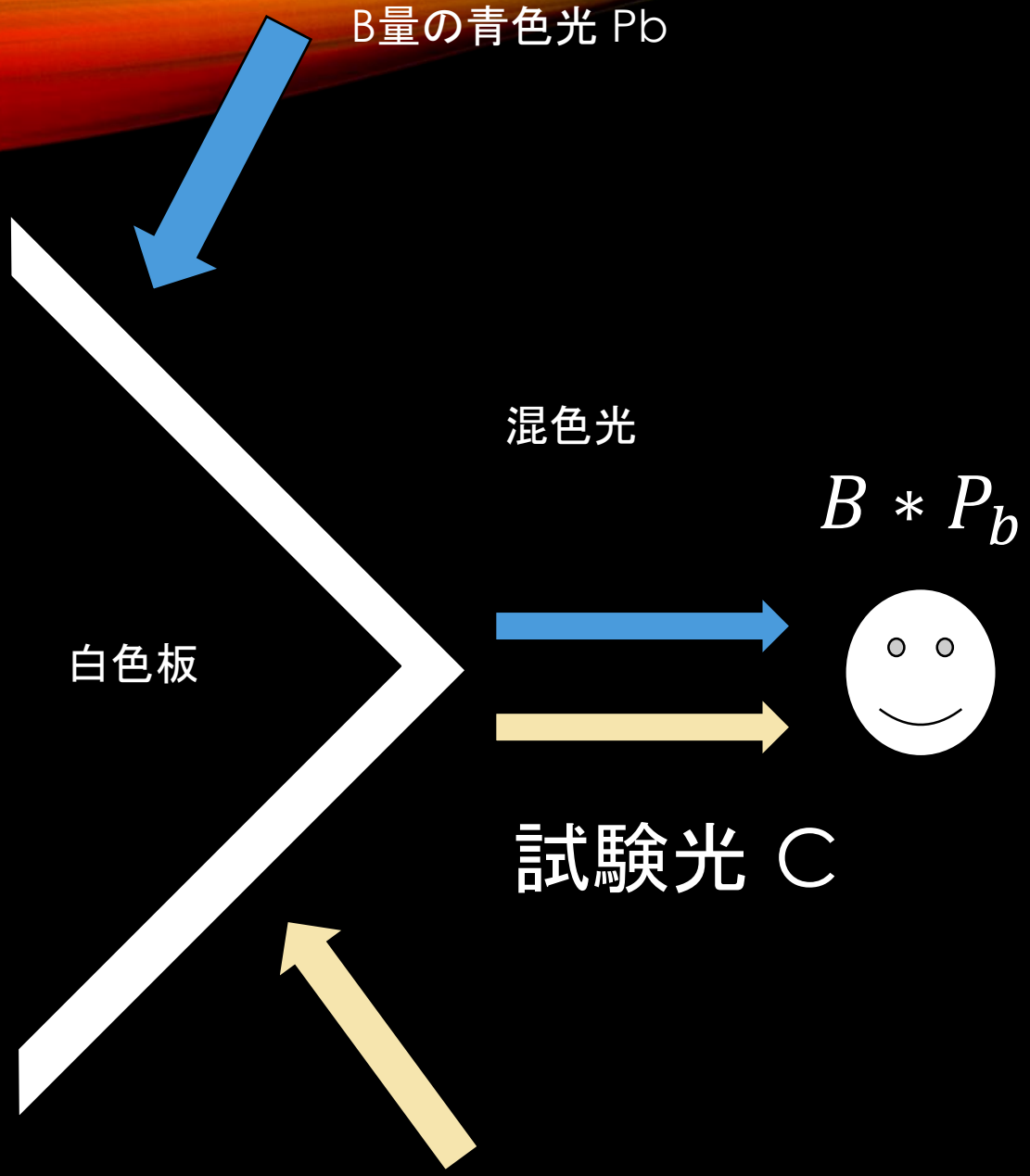
実験構成

白色板

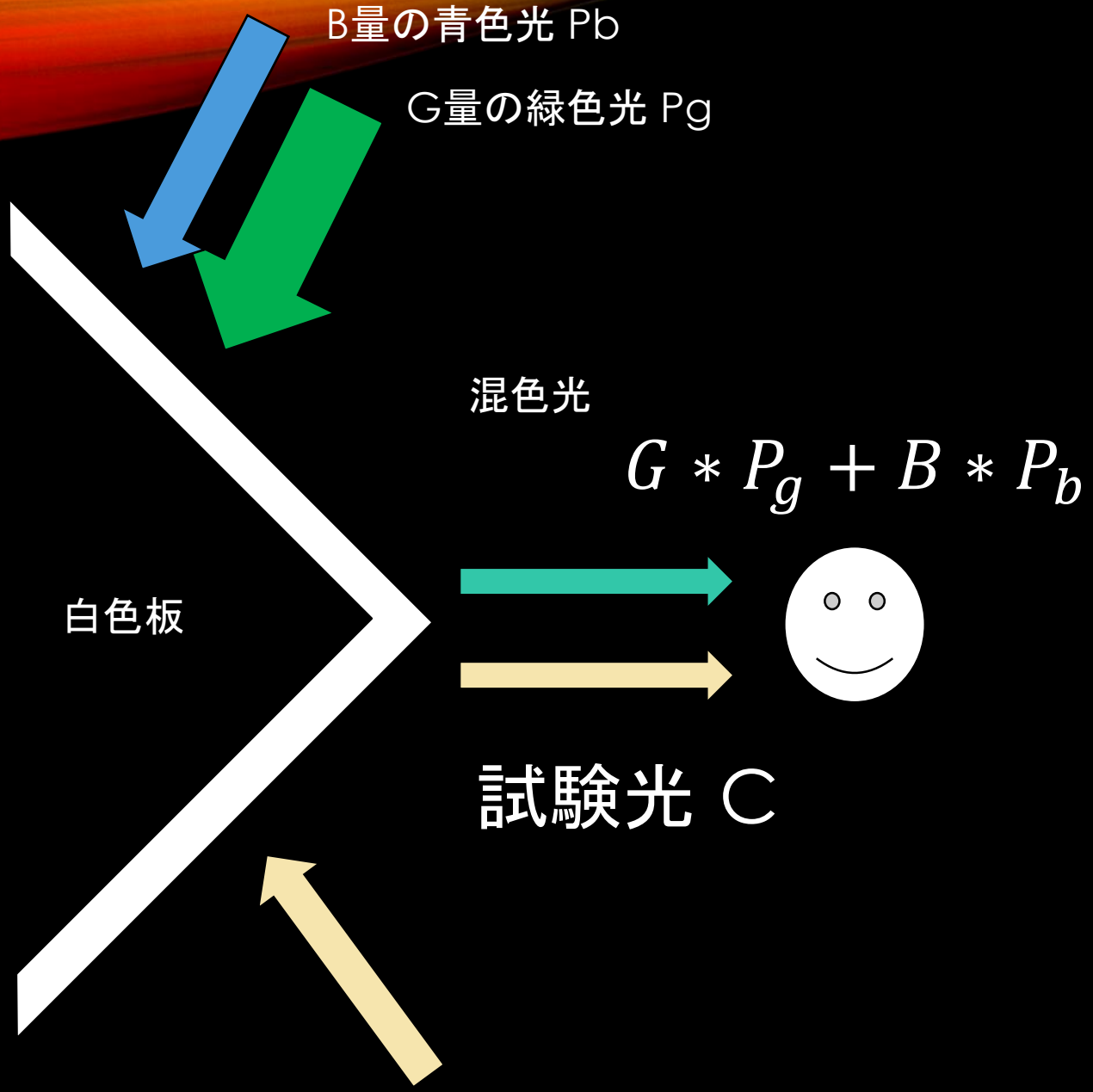
実験構成



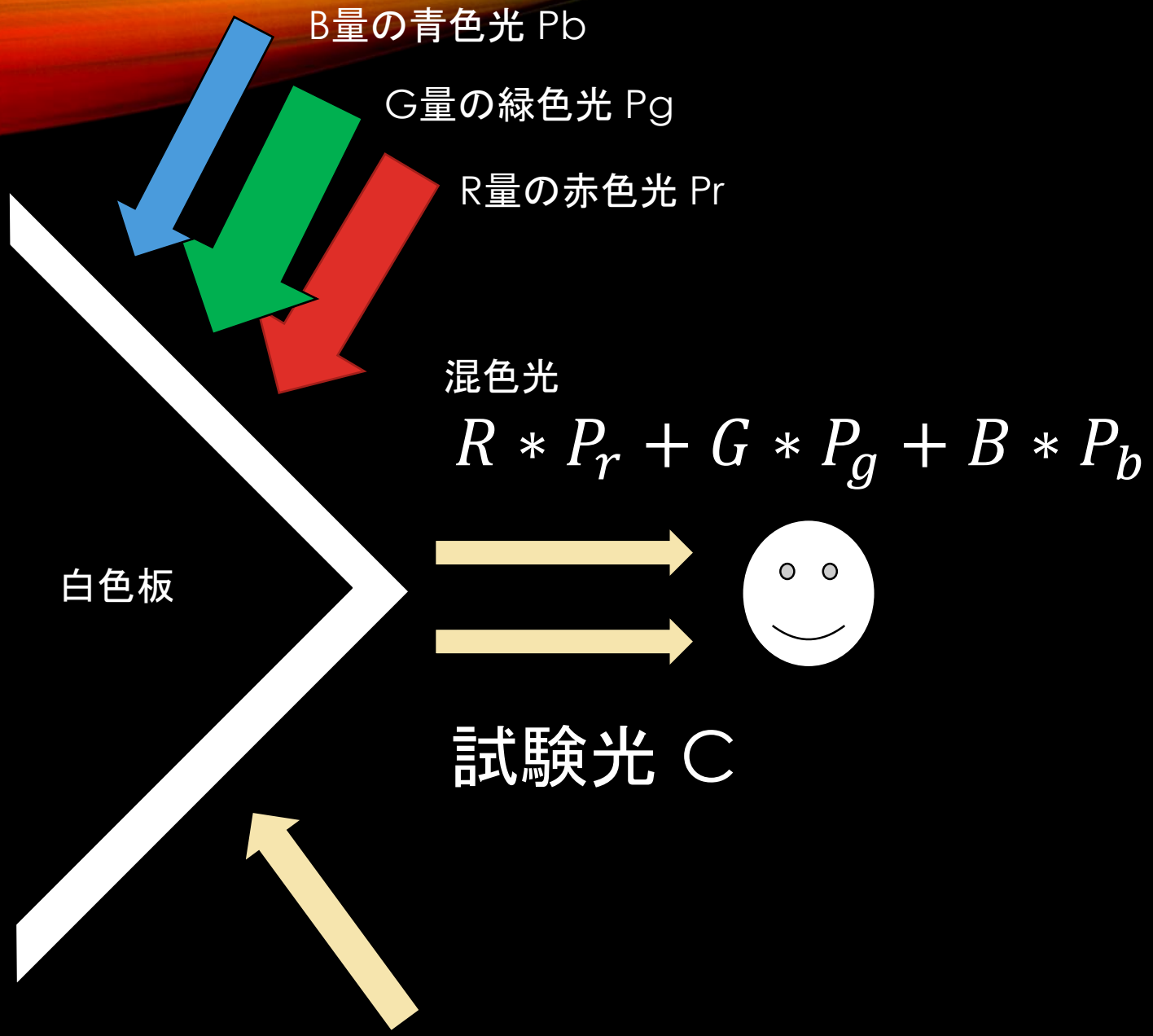
実験構成



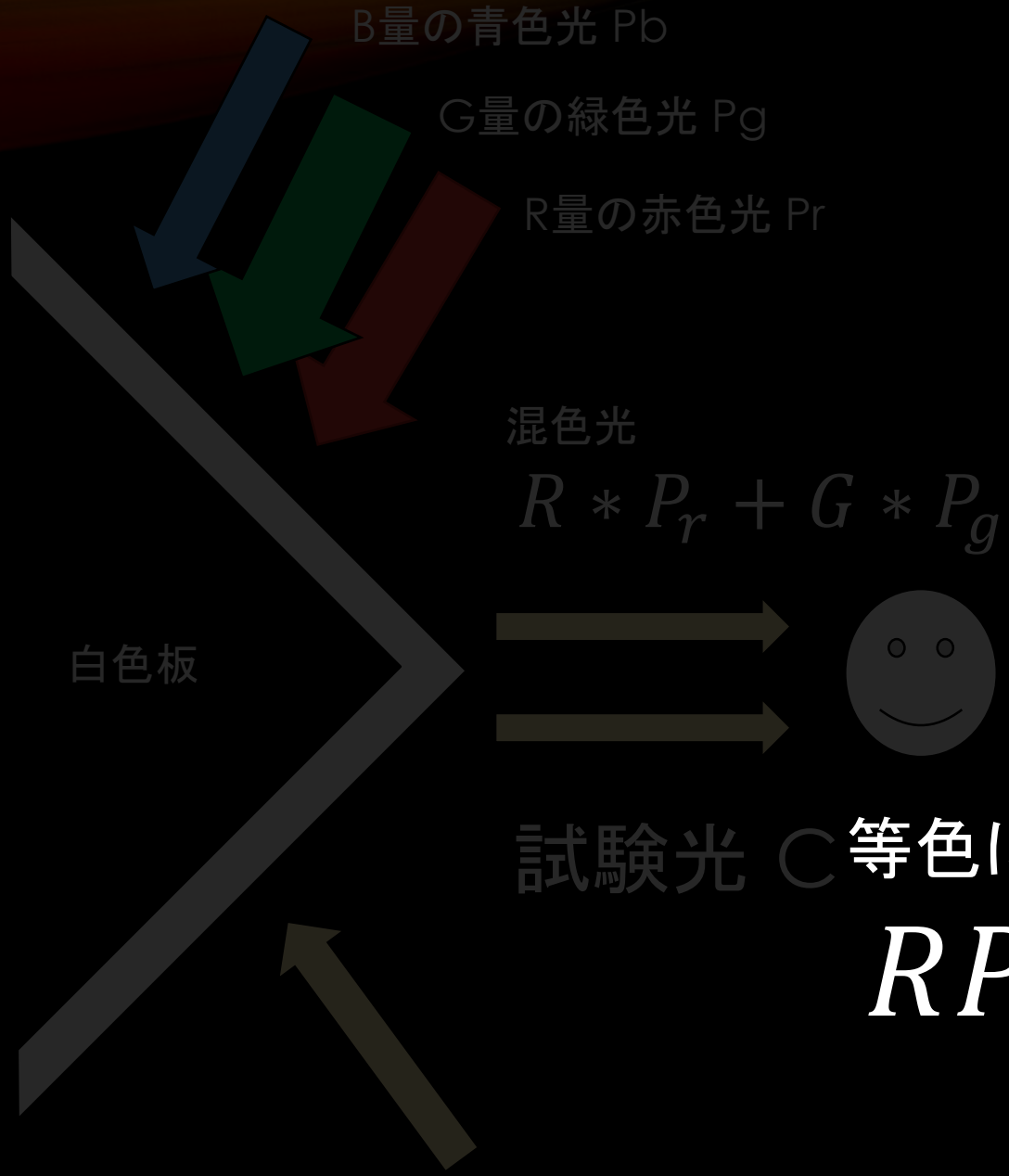
実験構成



実験構成



実験構成



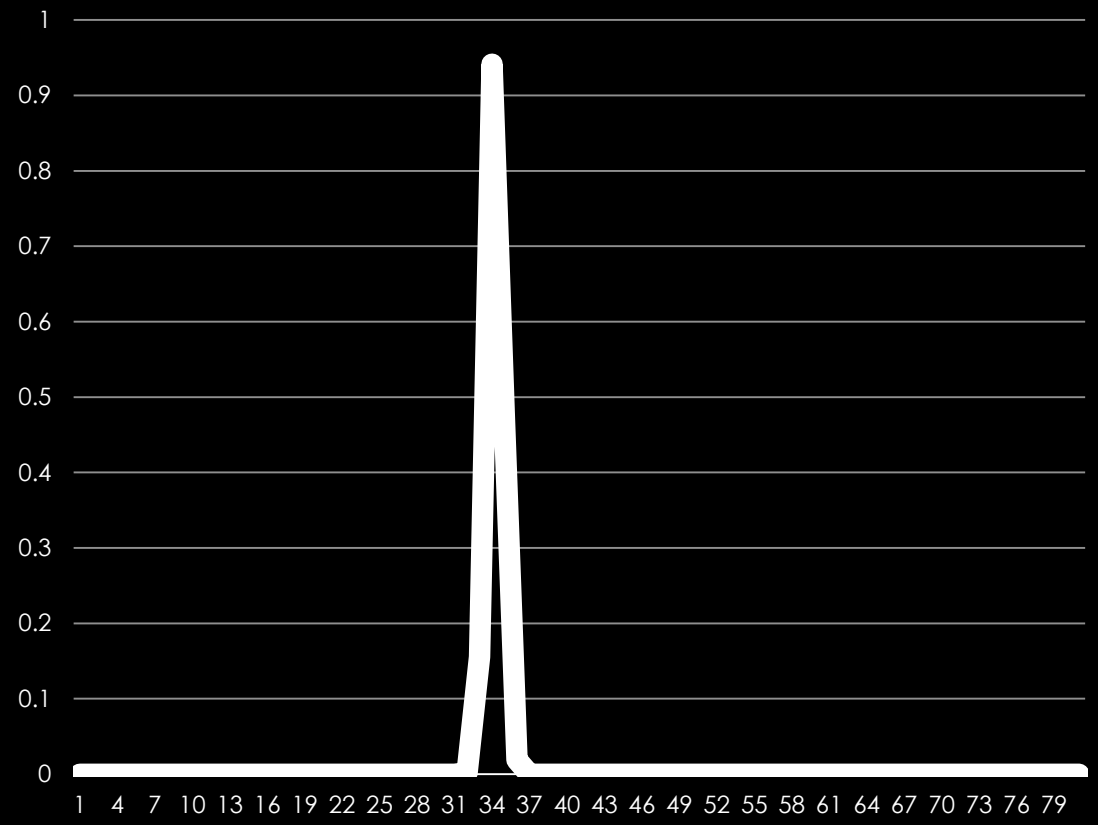
等色になる割合を求める！

$$RP_r + GP_g + BP_b = \mathrm{C}$$

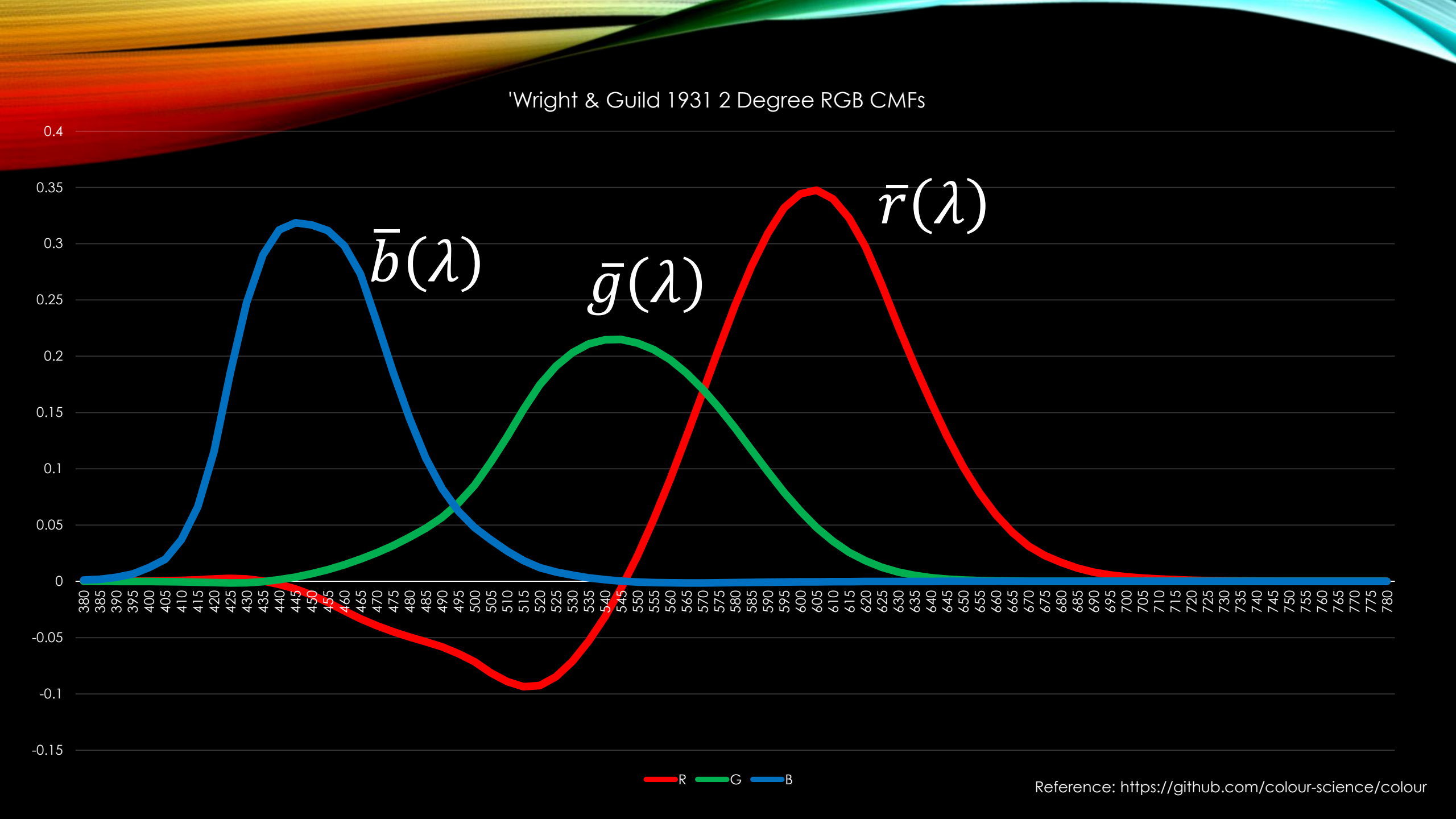
CIE(国際照明学会)が頑張って調べた

視野角は2度
1964年の実験で、10度にすると違う結果になった

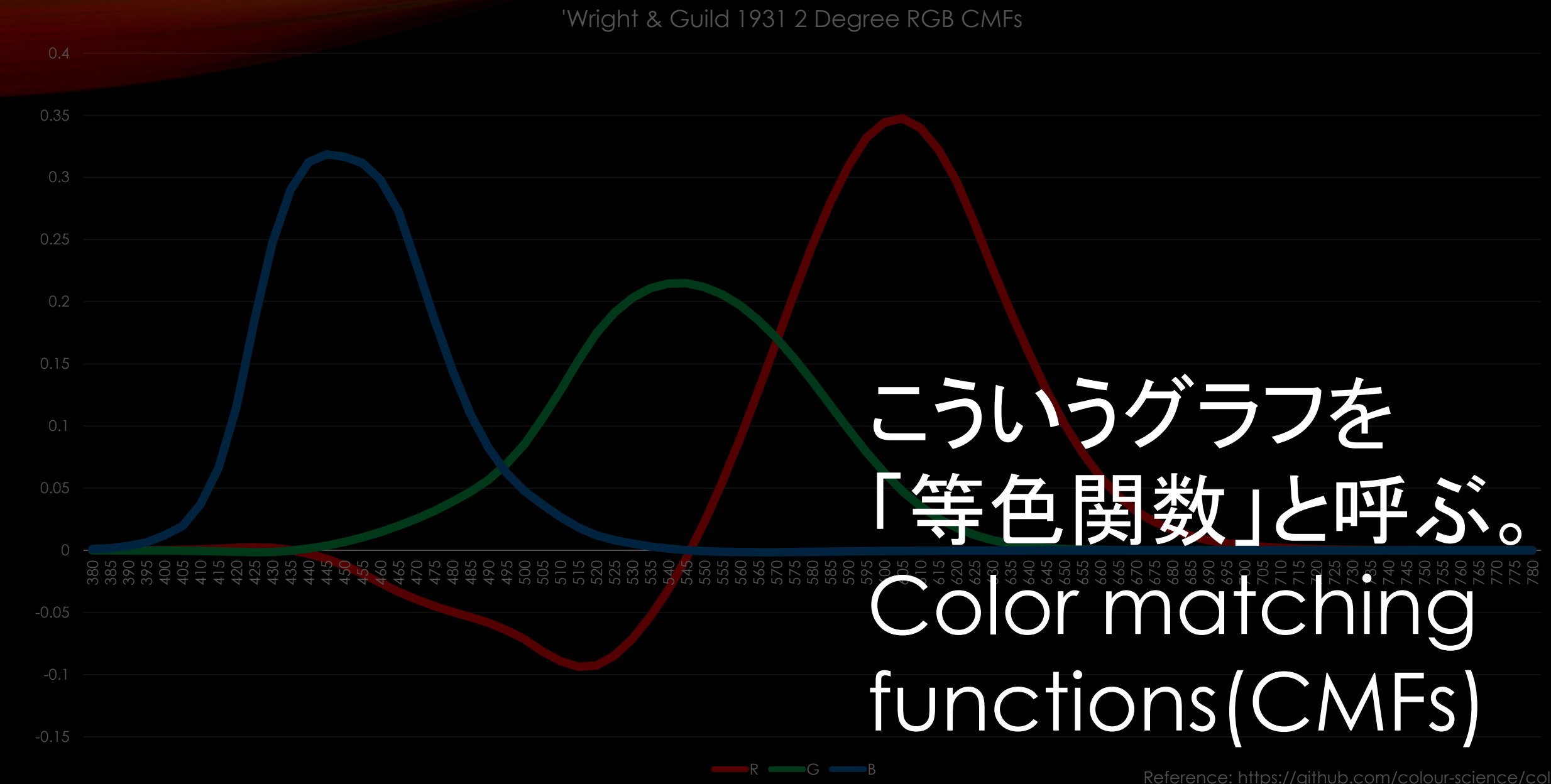
試験光C



- 試験光 C は単一波長の光源。
- 全可視光の波長範囲で等色実験した。
- スペクトルは左図のように、
  一波長だけ立つ。

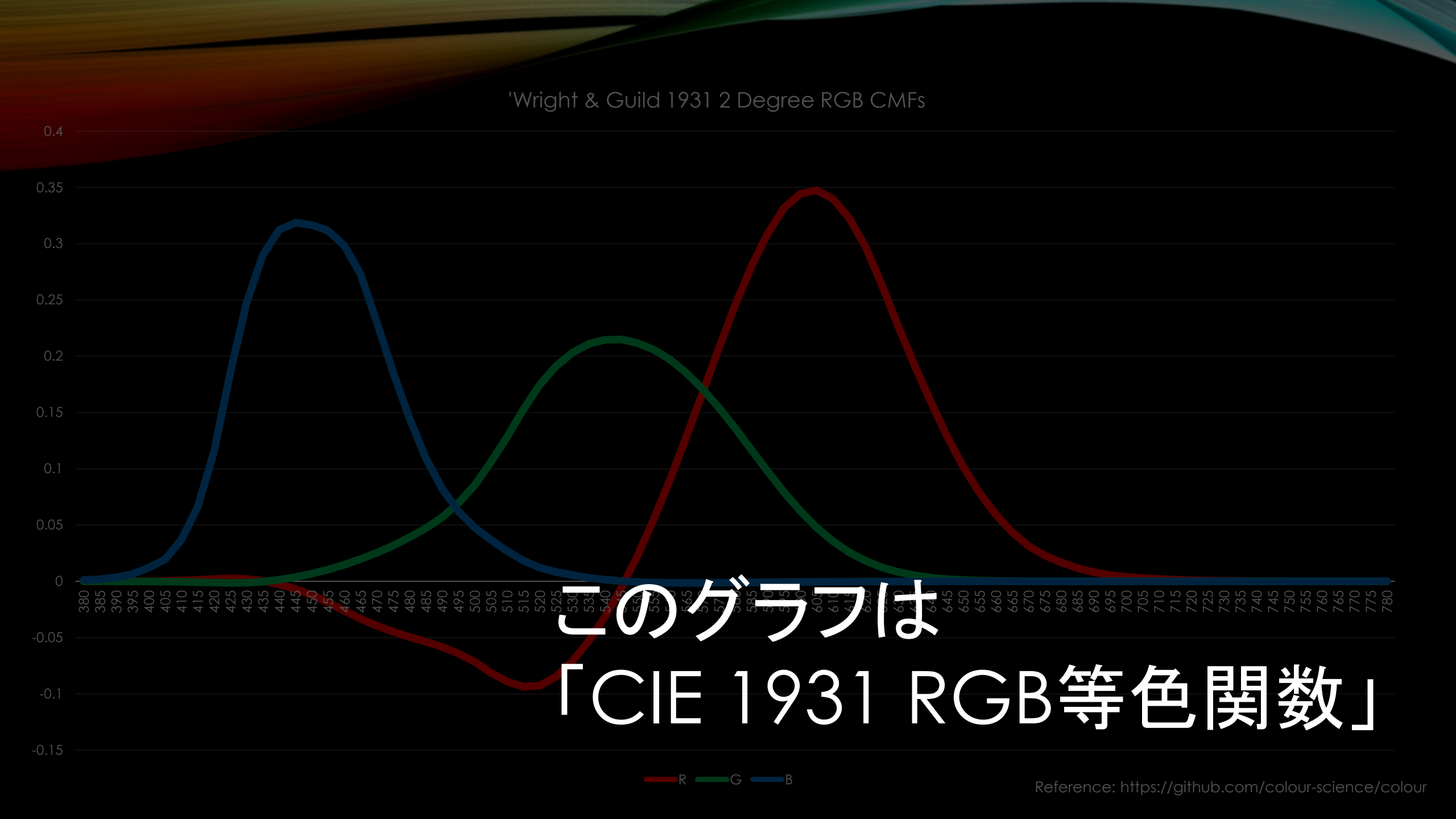


Reference: https://github.com/colour-science/colour



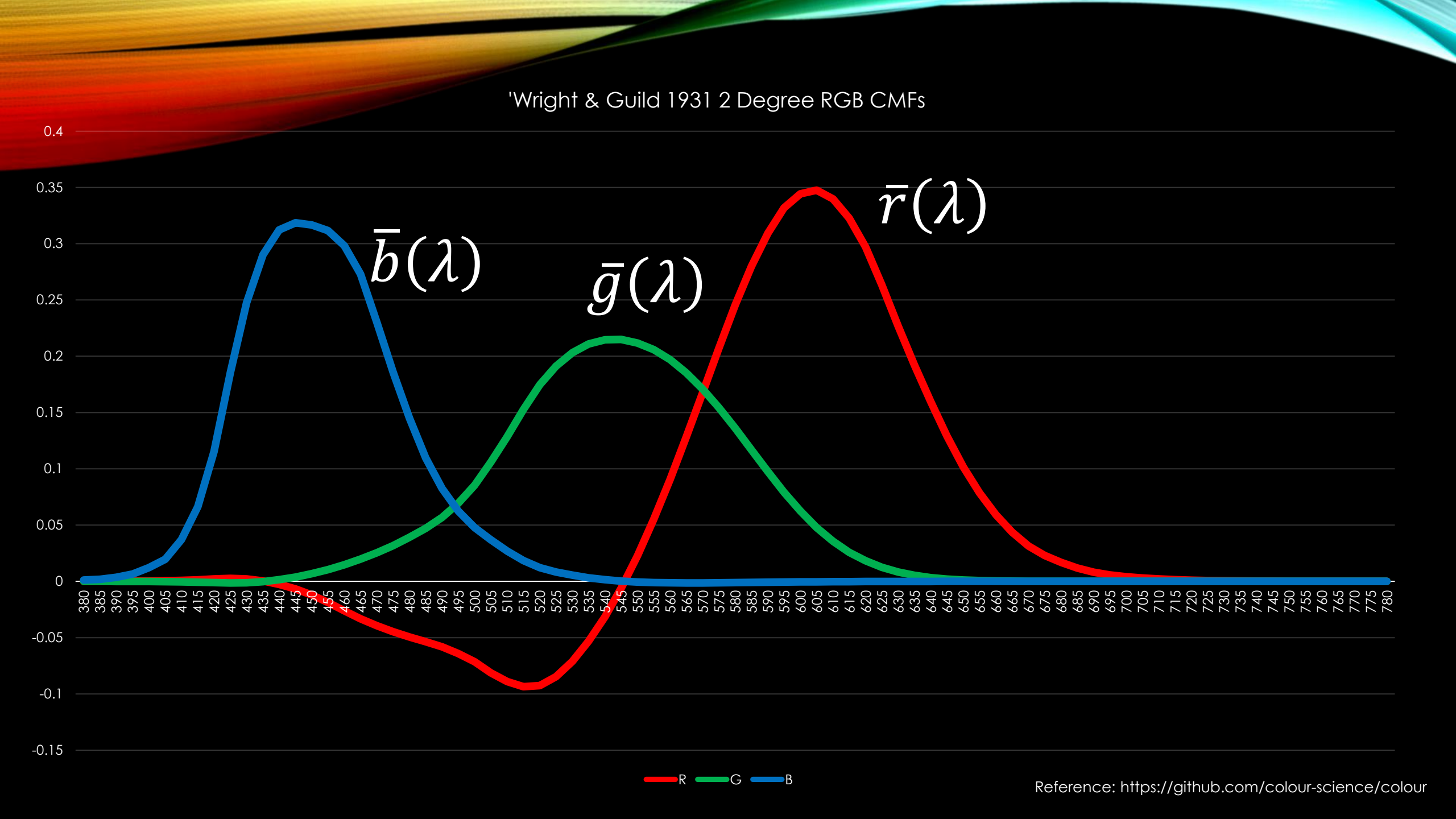
こういうグラフを
「等色関数」と呼ぶ。
Color matching functions(CMFs)

Reference: https://github.com/colour-science/colour



このグラフは「CIE 1931 RGB等色関数」

Reference: https://github.com/colour-science/colour

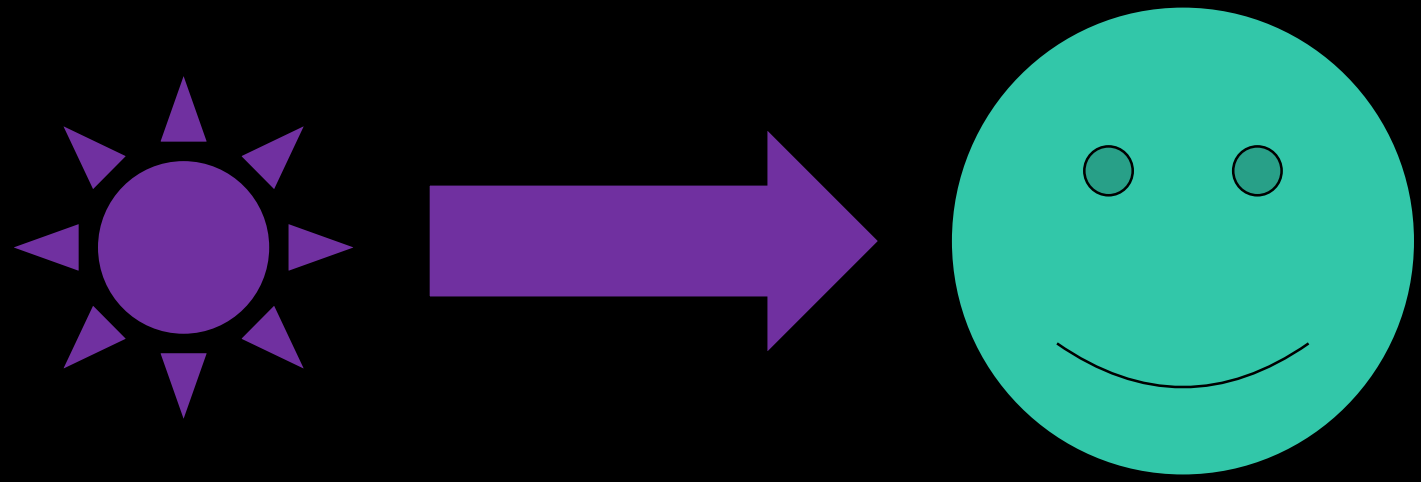


Reference: https://github.com/colour-science/colour

CIE1931 RGBにおける、
ある光 C(λ) の三刺激値は

$$R = \int C(\lambda)\,\bar{r}(\lambda)\,d\lambda$$
$$G = \int C(\lambda)\,\bar{g}(\lambda)\,d\lambda$$
$$B = \int C(\lambda)\,\bar{b}(\lambda)\,d\lambda$$

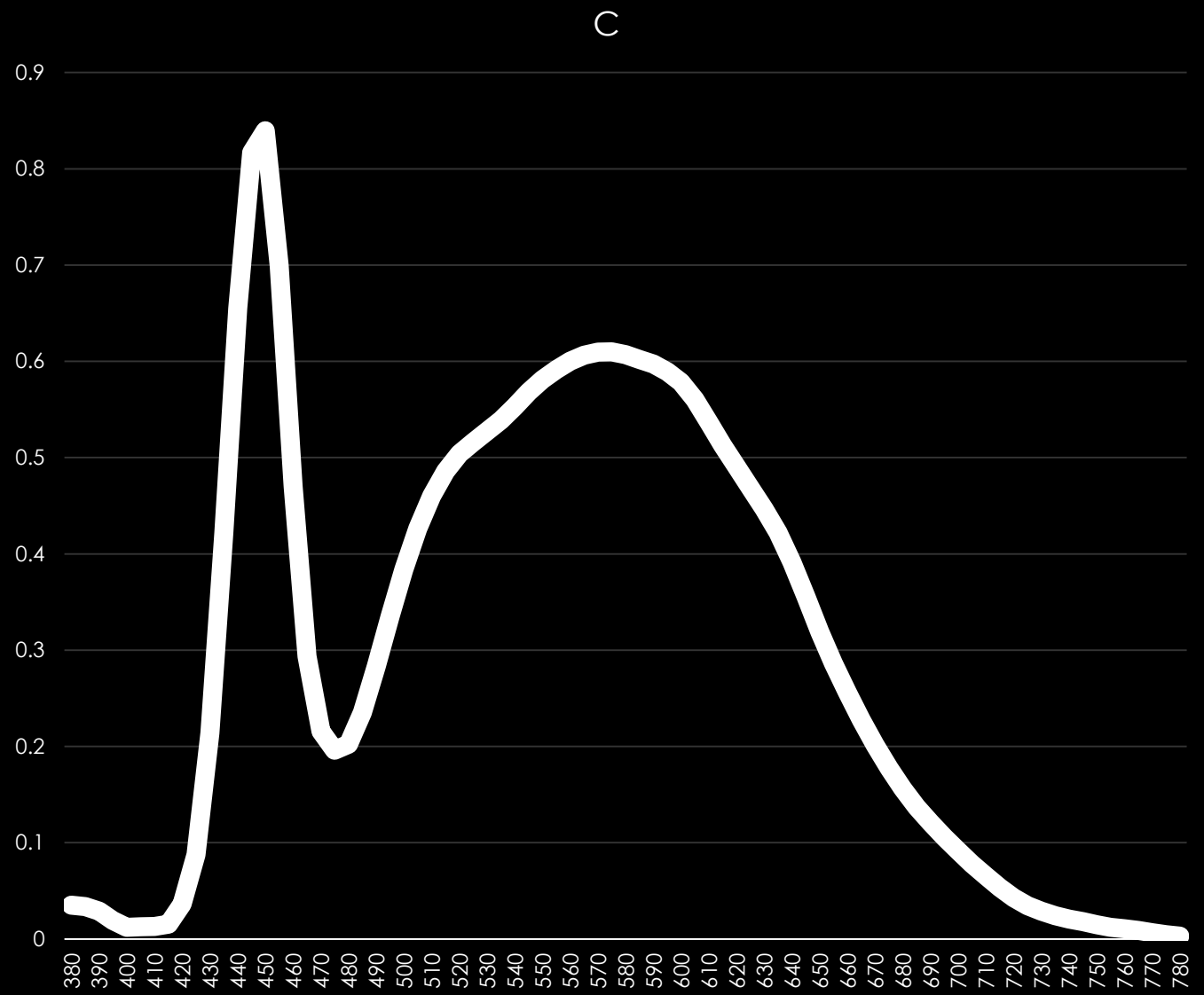
LMSと同様のシンプルなパターン



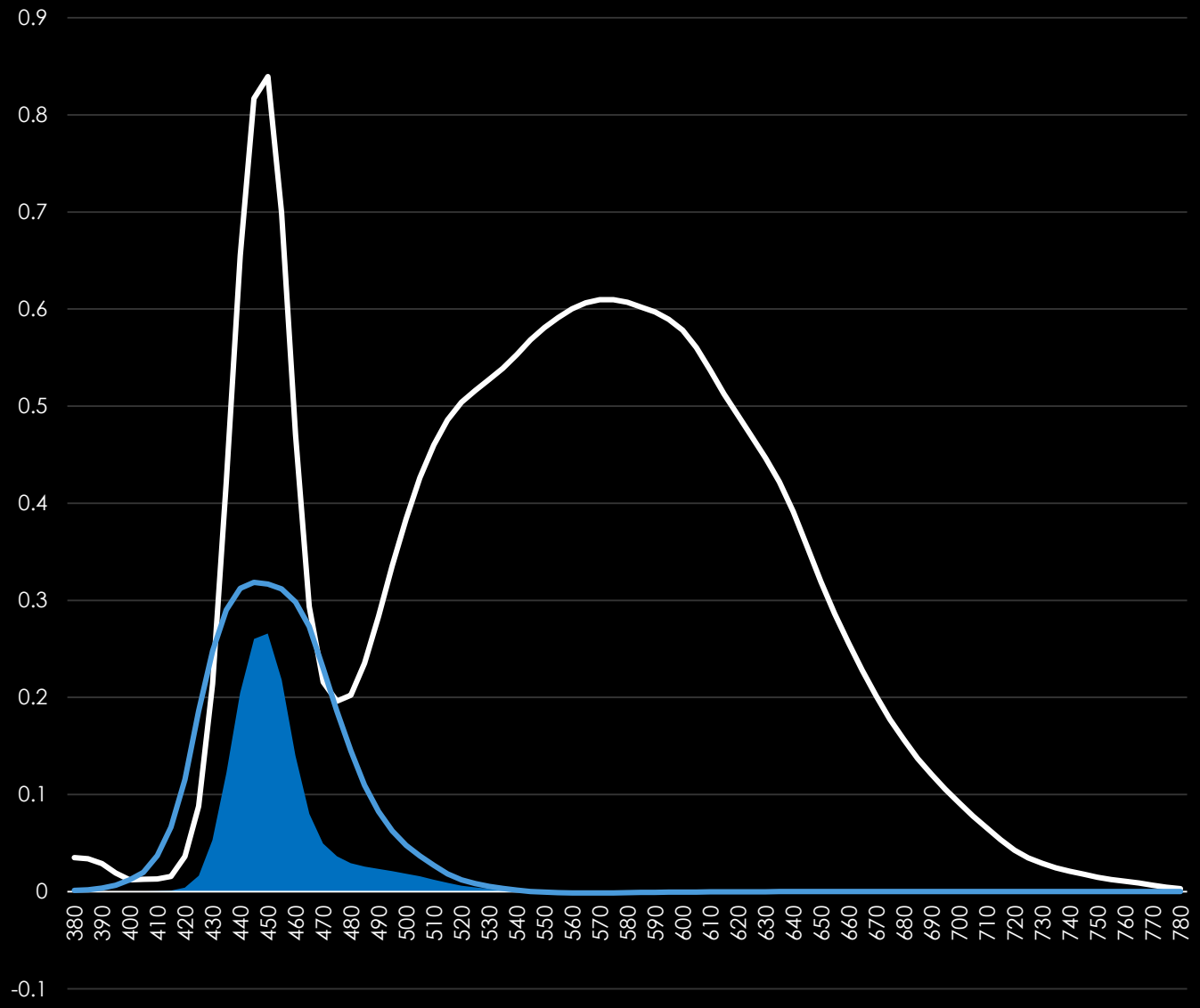
光源

ヒト視覚

入力光 $C(\lambda)$

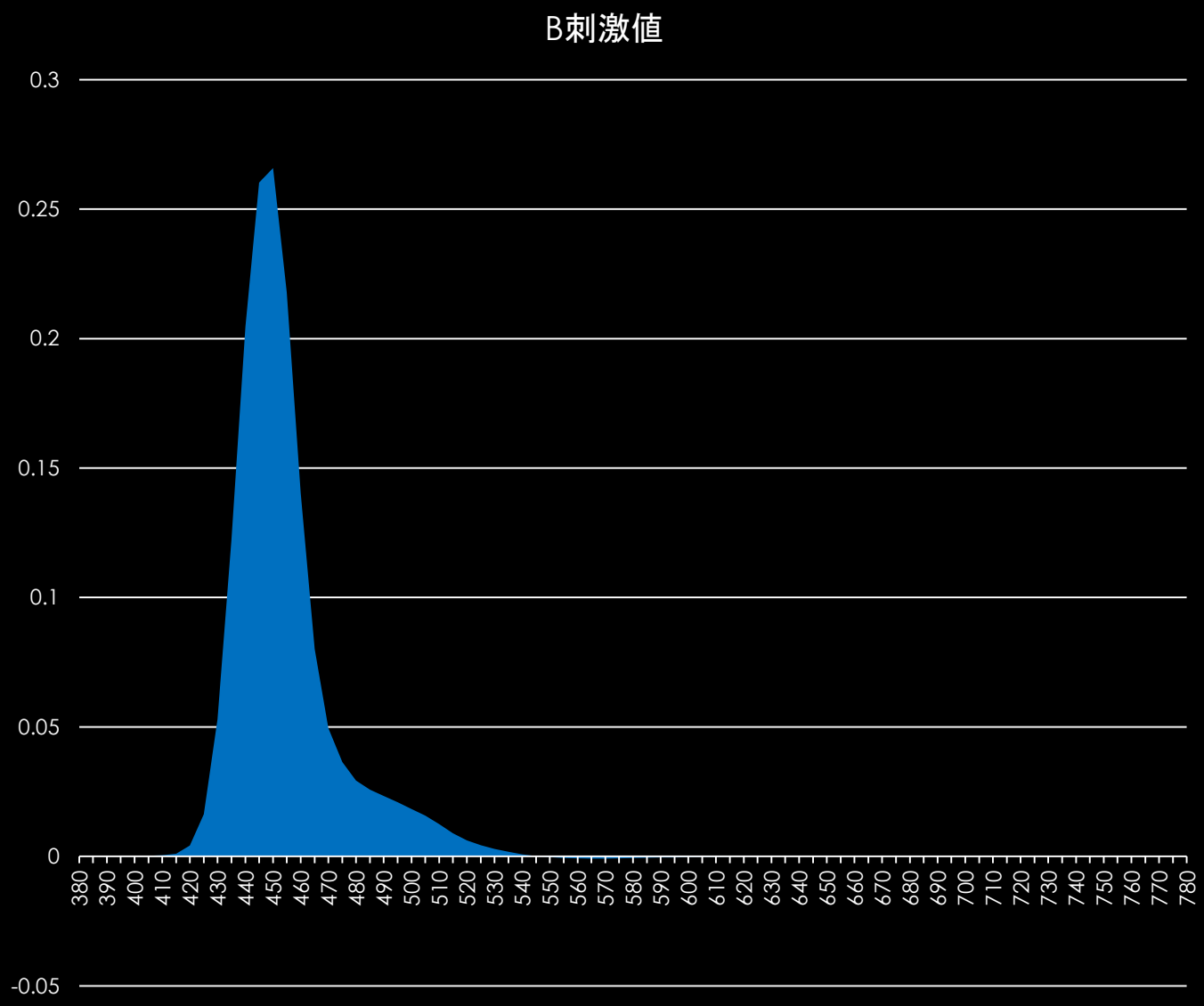

C
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
380 390 400 410 420 430 440 450 460 470 480 490 500 510 520 530 540 550 560 570 580 590 600 610 620 630 640 650 660 670 680 690 700 710 720 730 740 750 760 770 780

入力光$C(\lambda)$と
等色関数$\bar{\mathrm{b}}(\lambda)$をかける



積分して面積を求める

Bの強さ、つまり青さが求まる



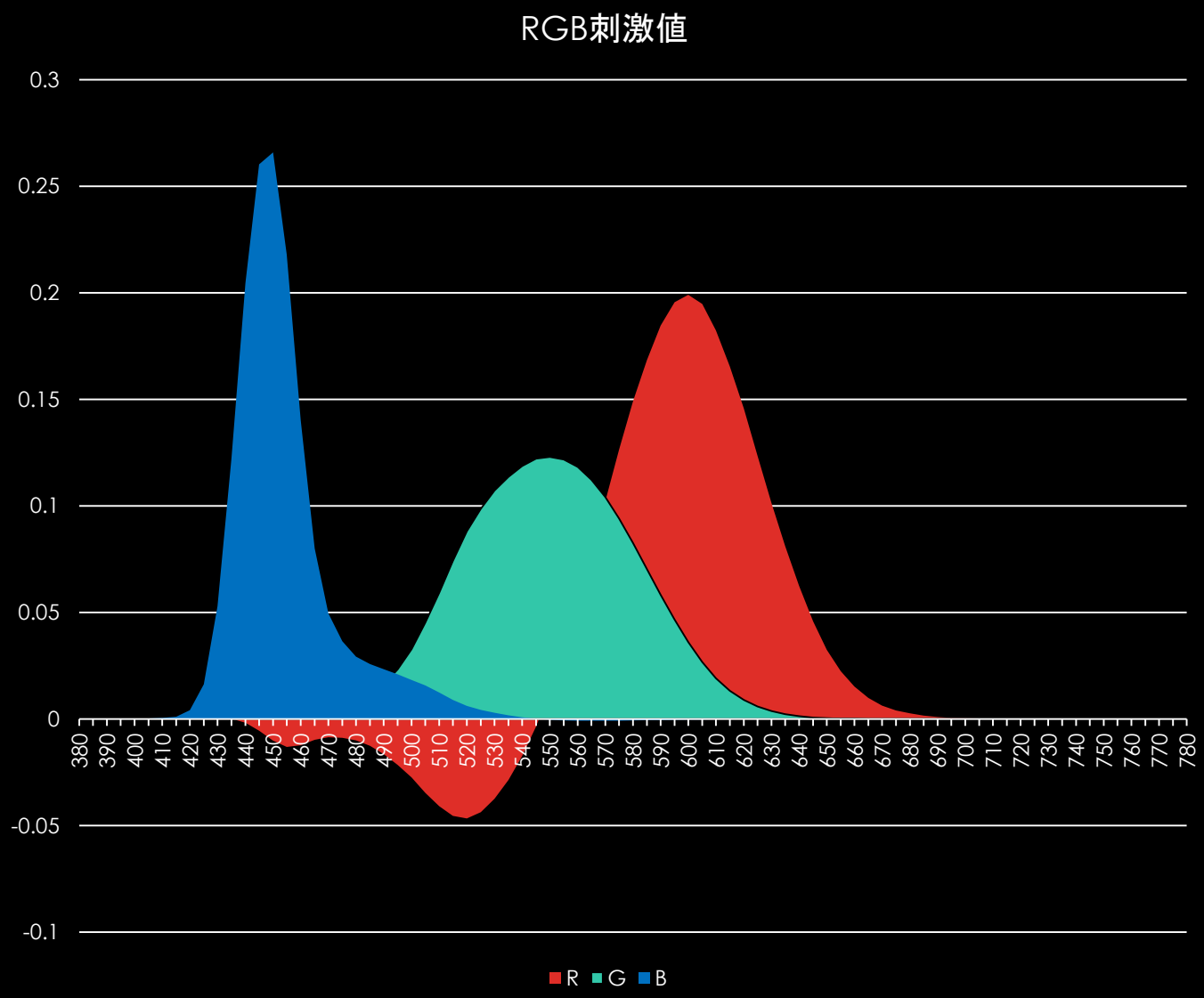
R,G,B全て同様に
求める。

R : 2.048149

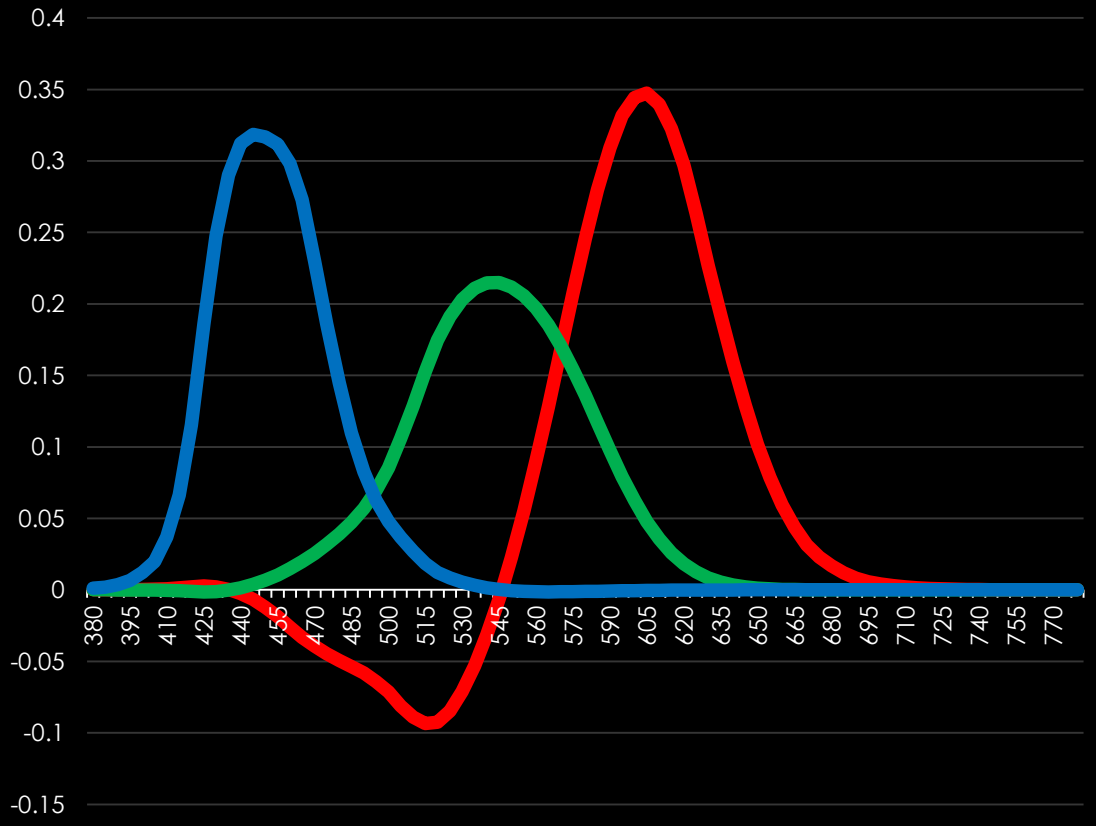
G : 2.00927

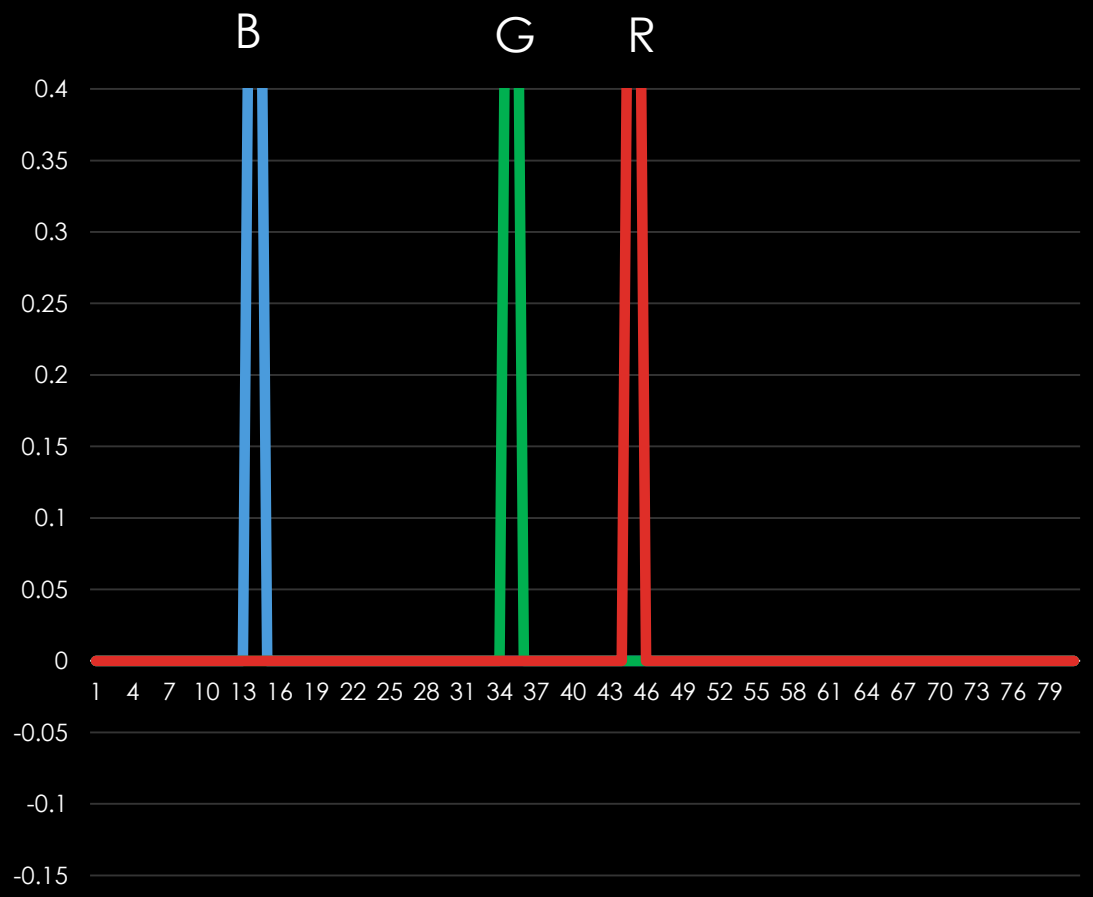
B : 1.616872

この光は、
若干オレンジの白。



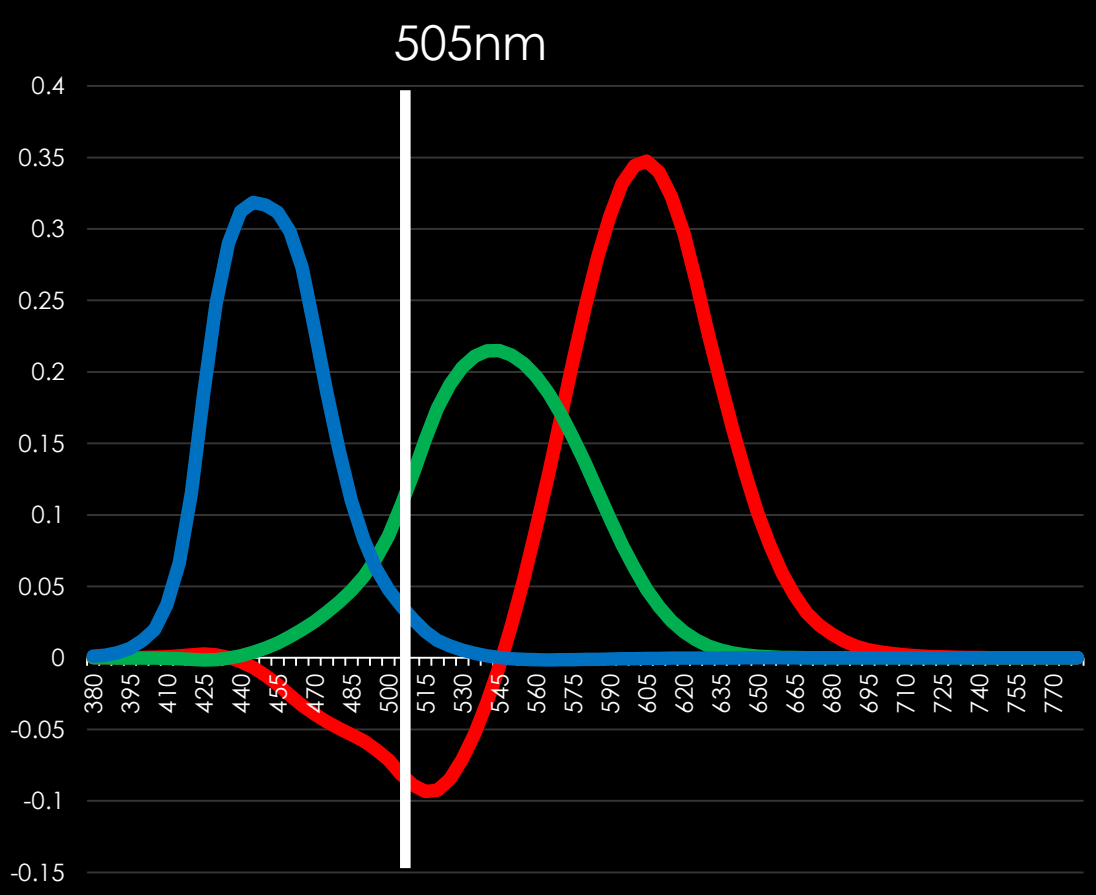
等色関数、つまり何なの？

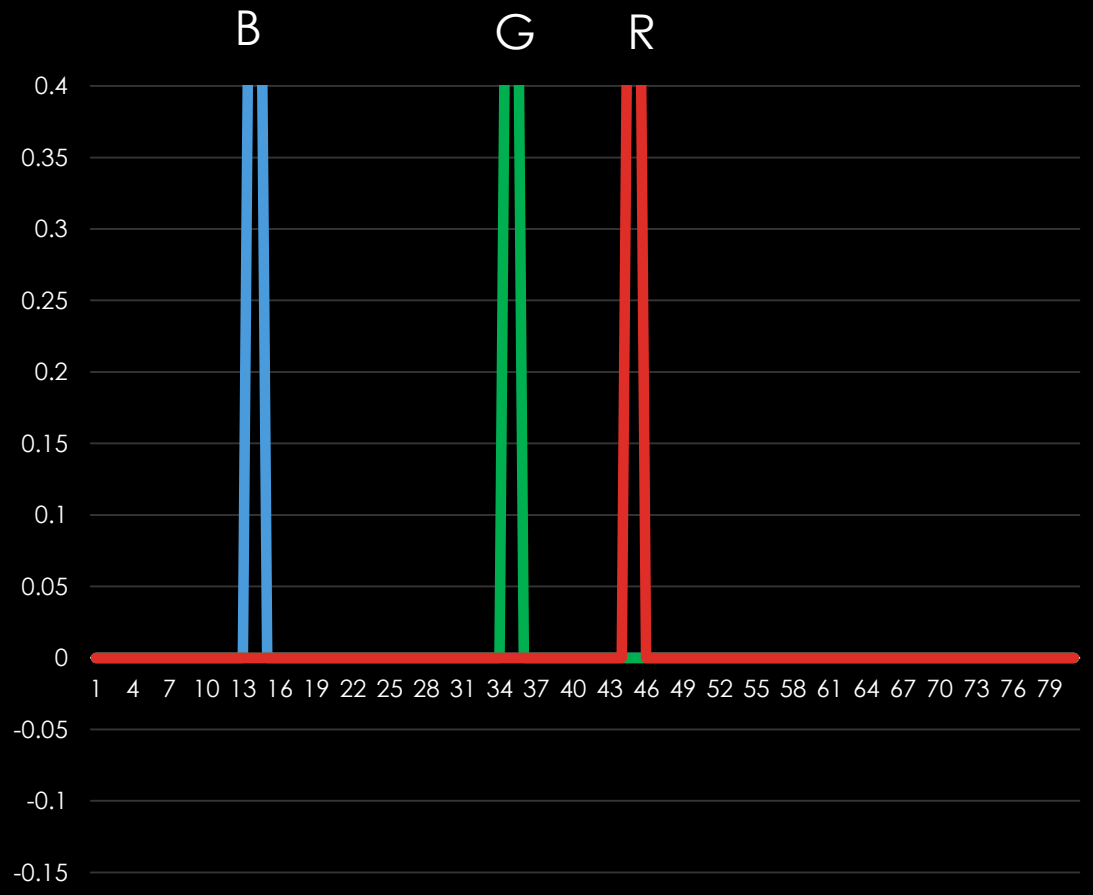




Reference: https://github.com/colour-science/colour

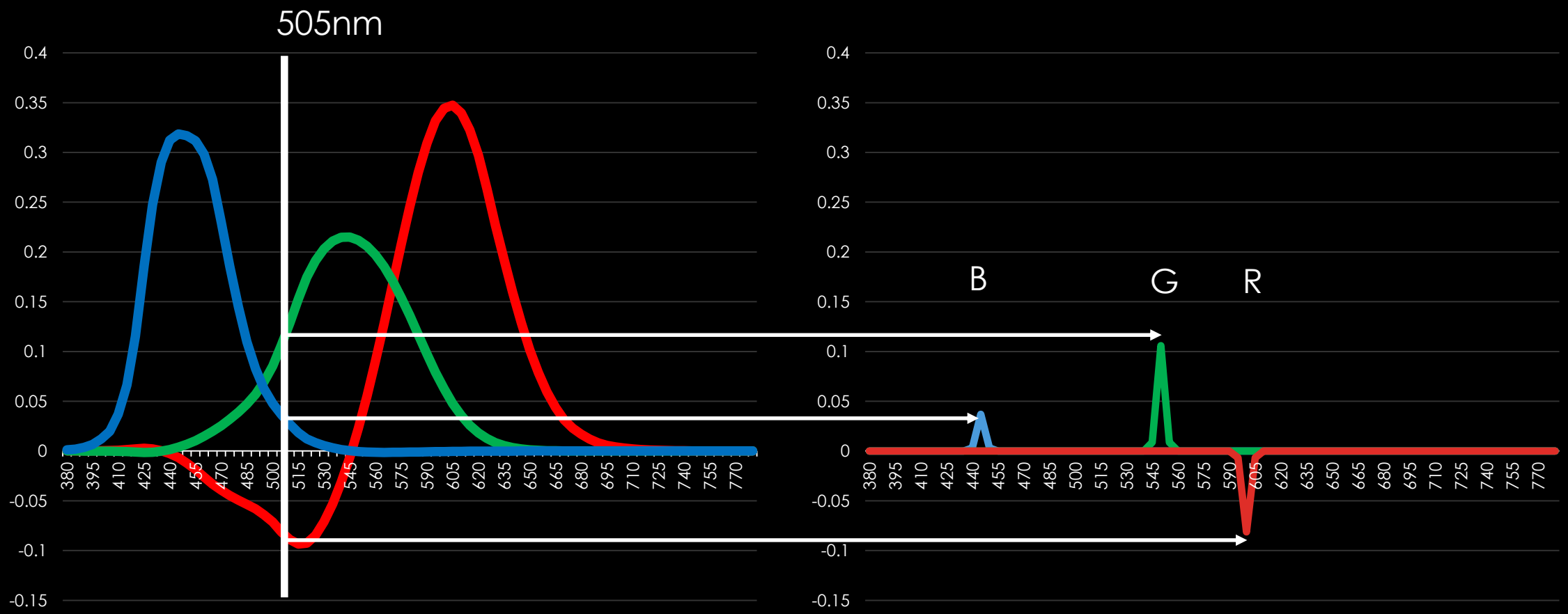
たとえば505nm





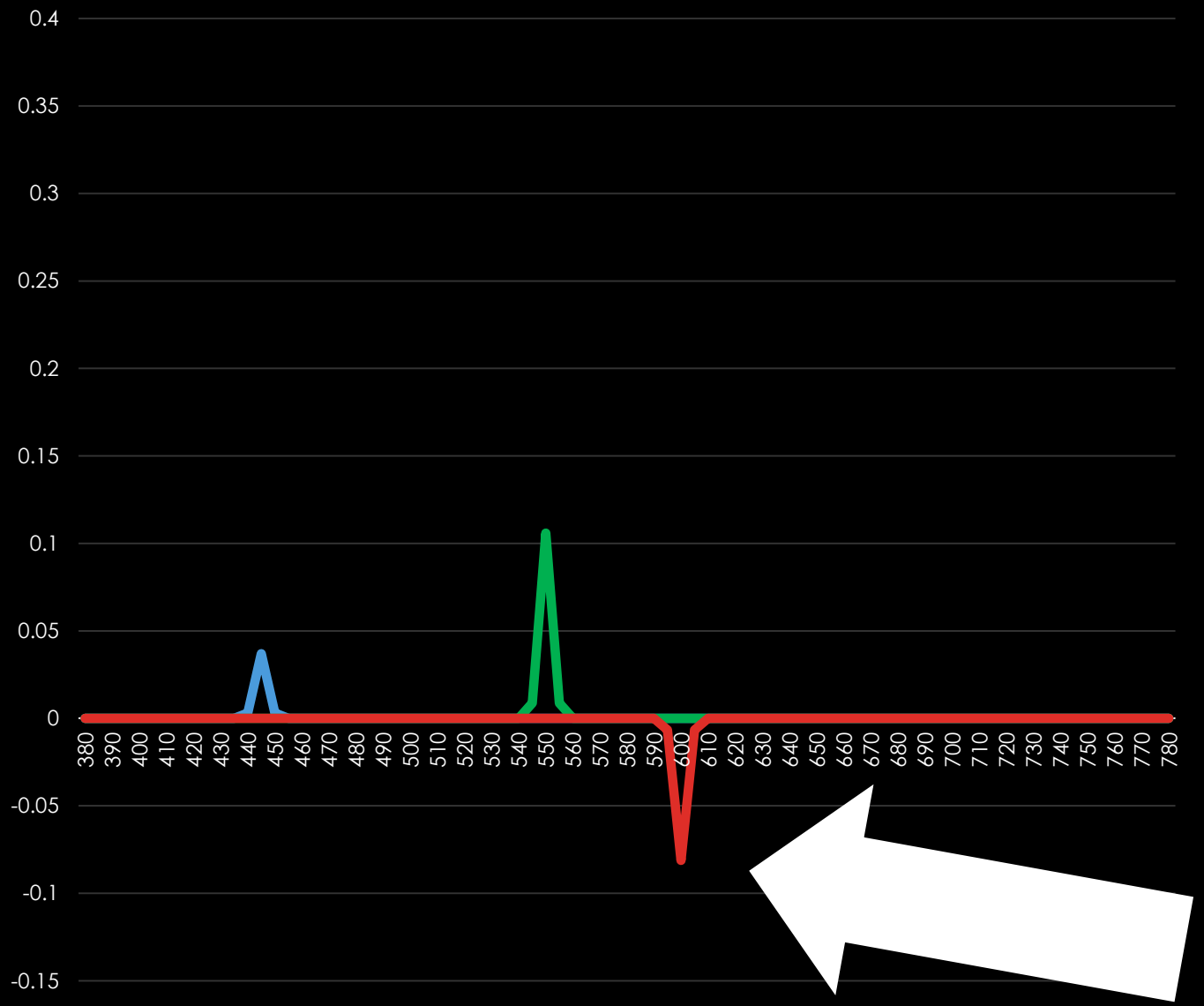
Reference: https://github.com/colour-science/colour

等色関数は原色のバランス

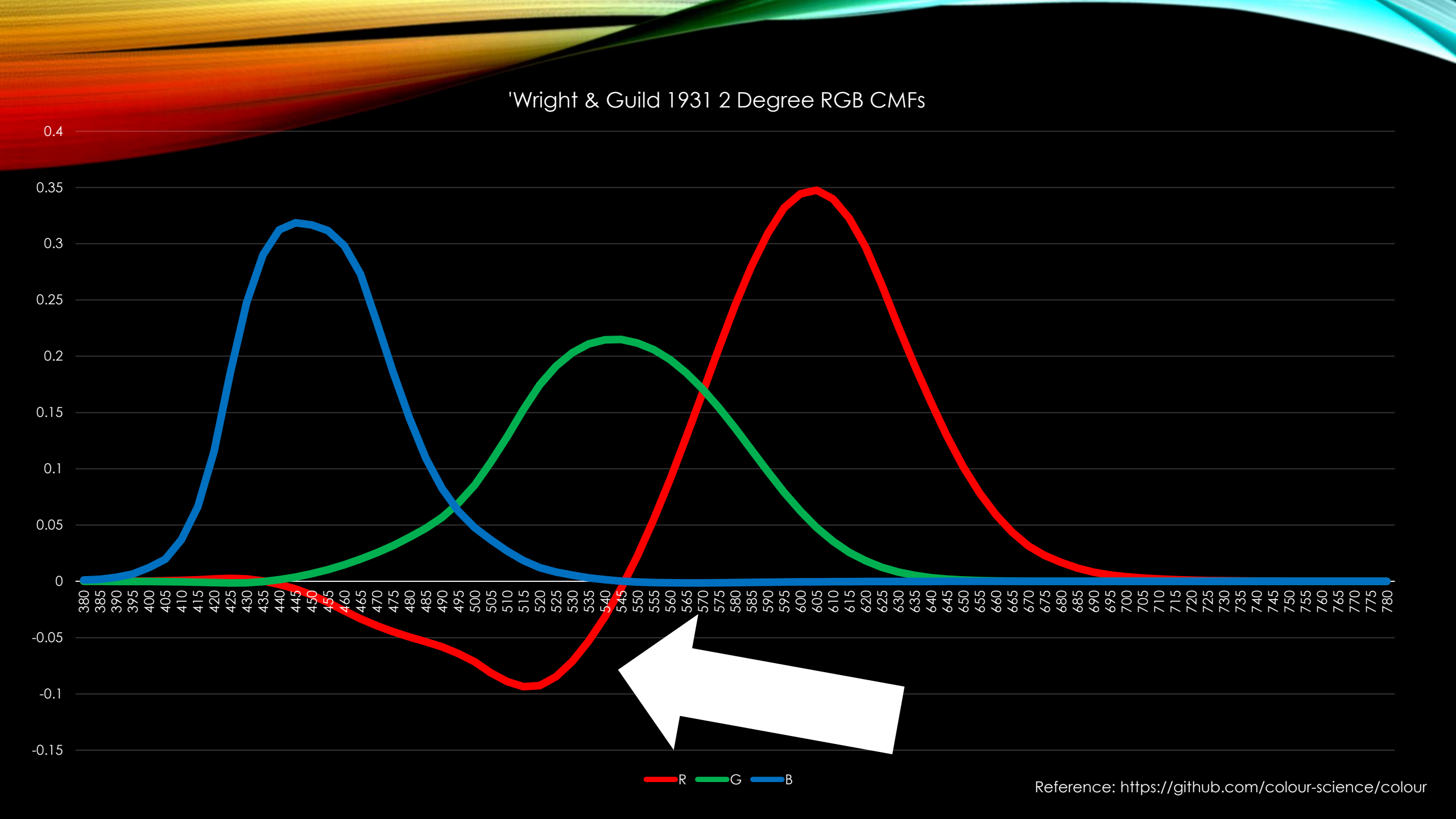


Reference: https://github.com/colour-science/colour

ん？



Reference: https://github.com/colour-science/colour

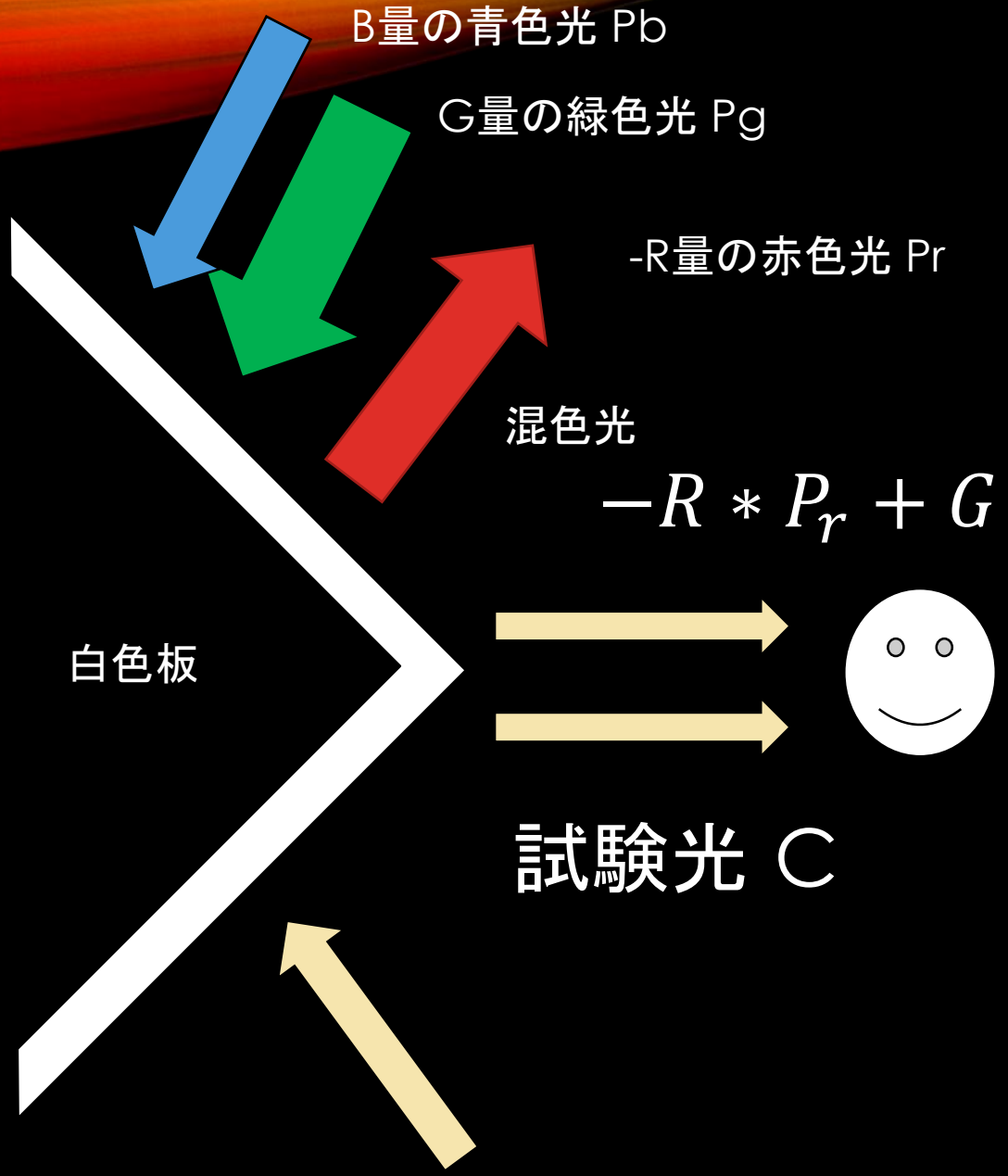


Reference: https://github.com/colour-science/colour

'Wright & Guild 1931 2 Degree RGB CMFs
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.05
-0.1
-0.15
380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780
R
G
B

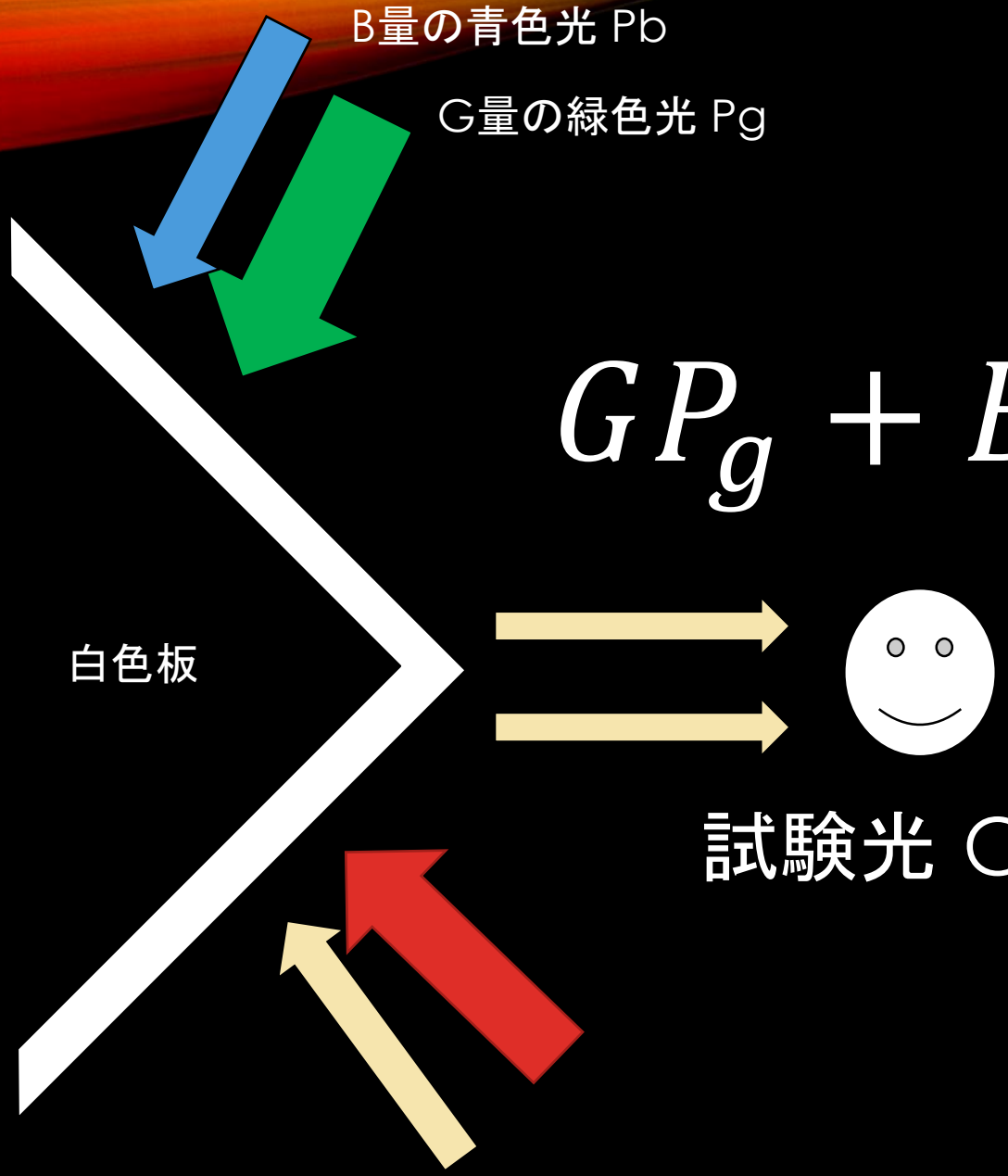
感度が負？？

負の光？



$$-R * P_r + G * P_g + B * P_b$$

負の感度



$$GP_g + BP_b = C + RP_r$$

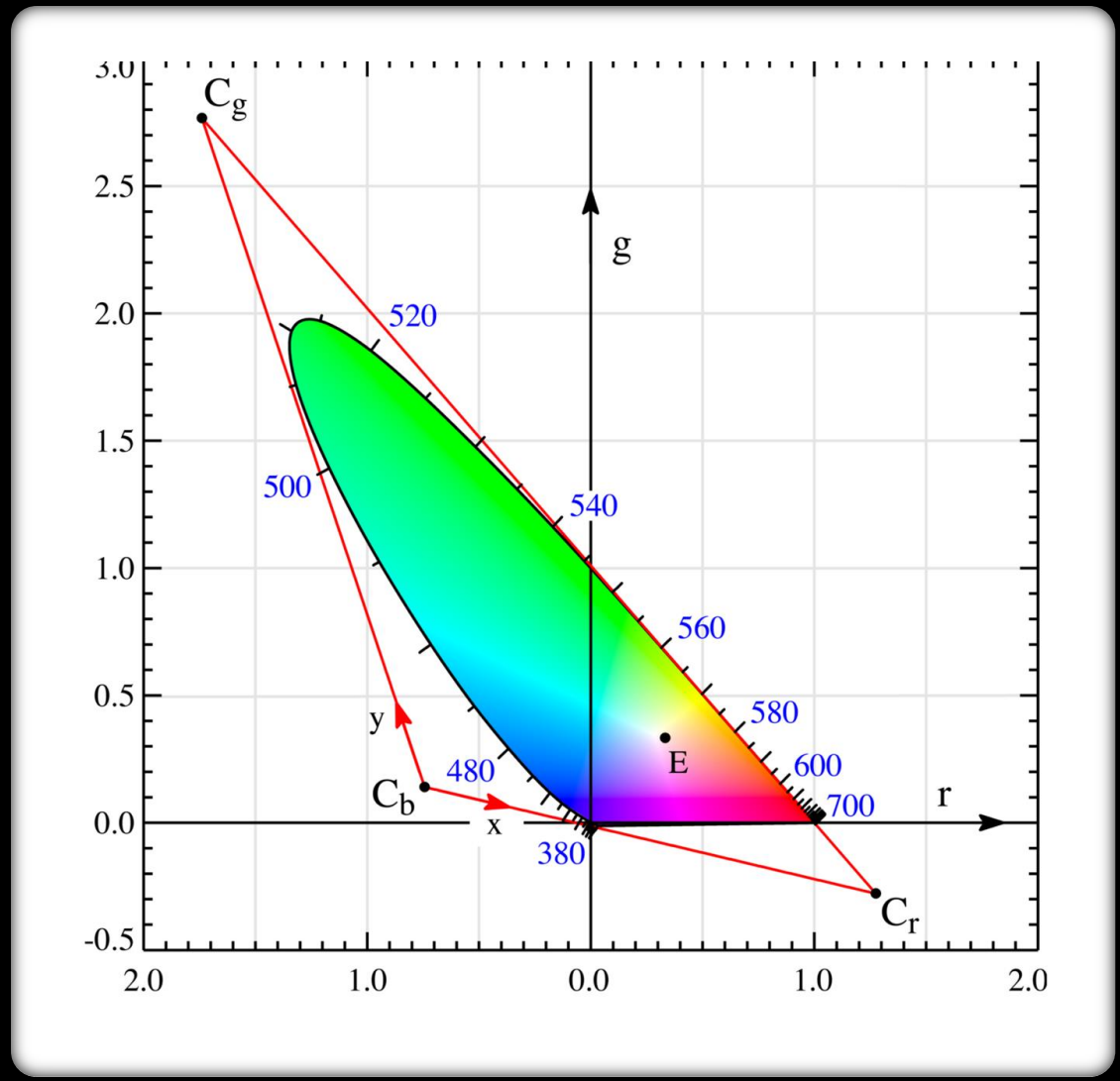
負は使いにくい！
正だけにしよう

どうする？

仮想頂点を作る

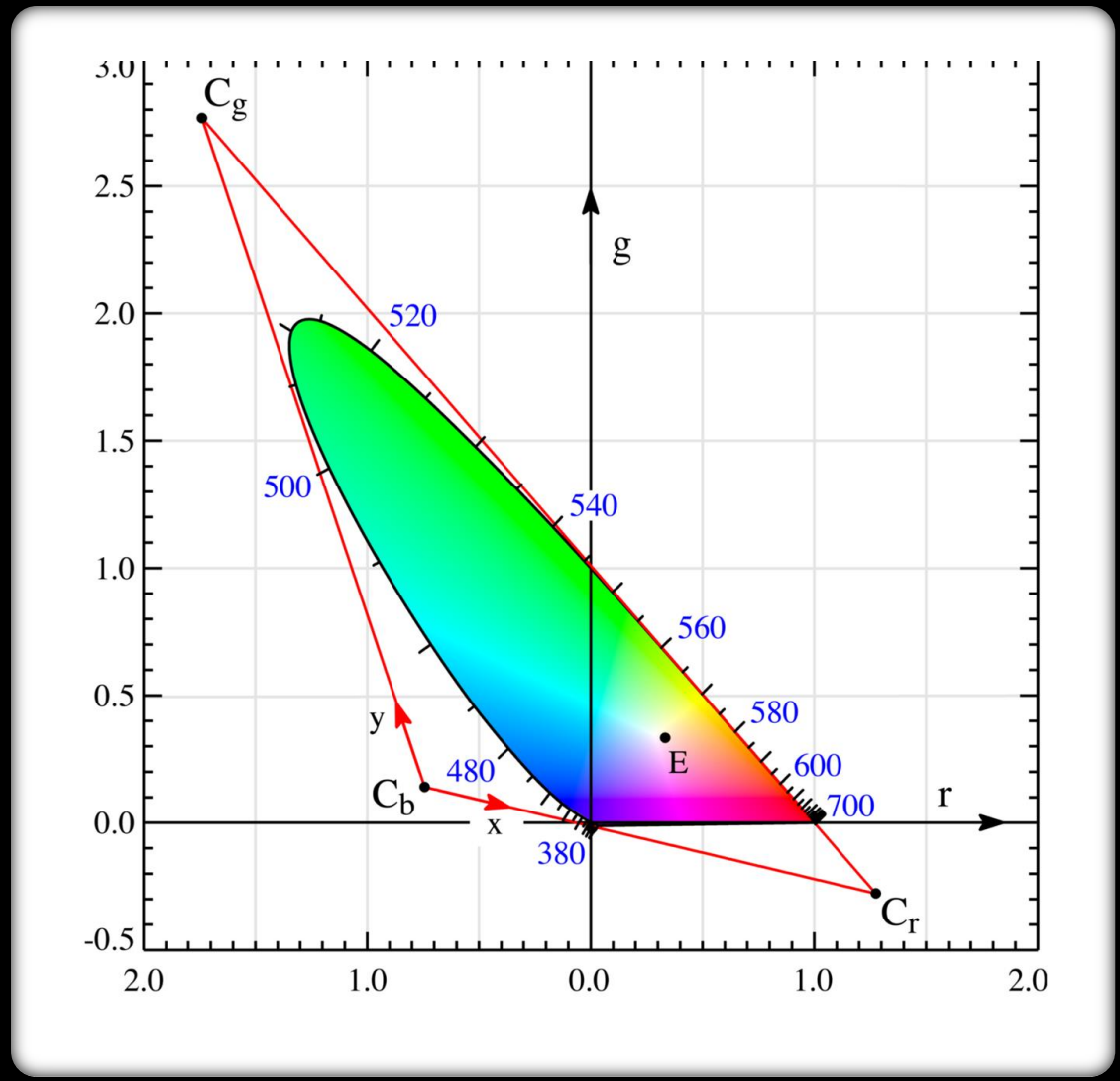
- 色を全て含む頂点を
  仮想的に作る。

- 右図の Cr, Cg, Cb を
  頂点にとるような
  線形変換をしてやる。



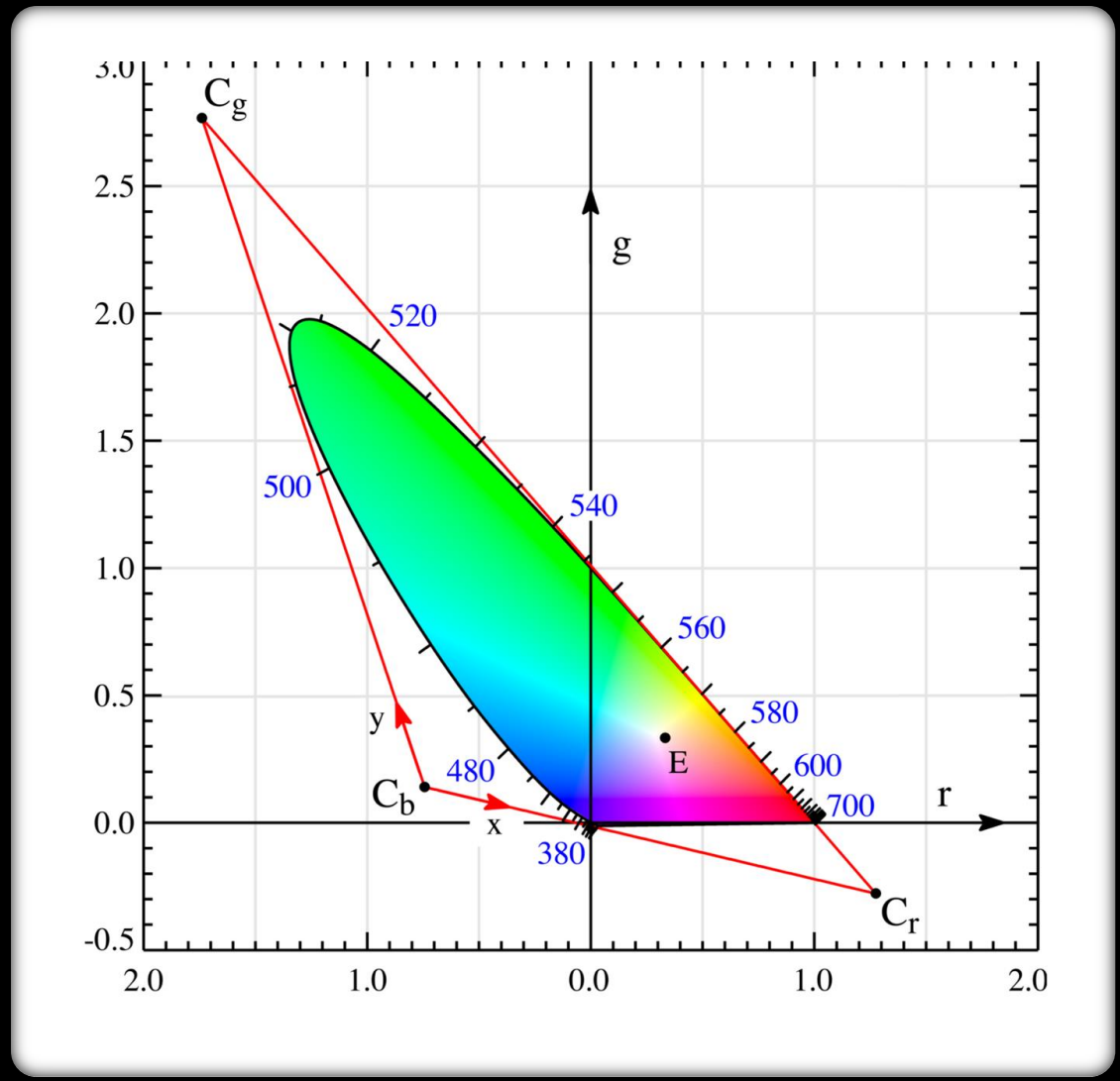
RG色度図

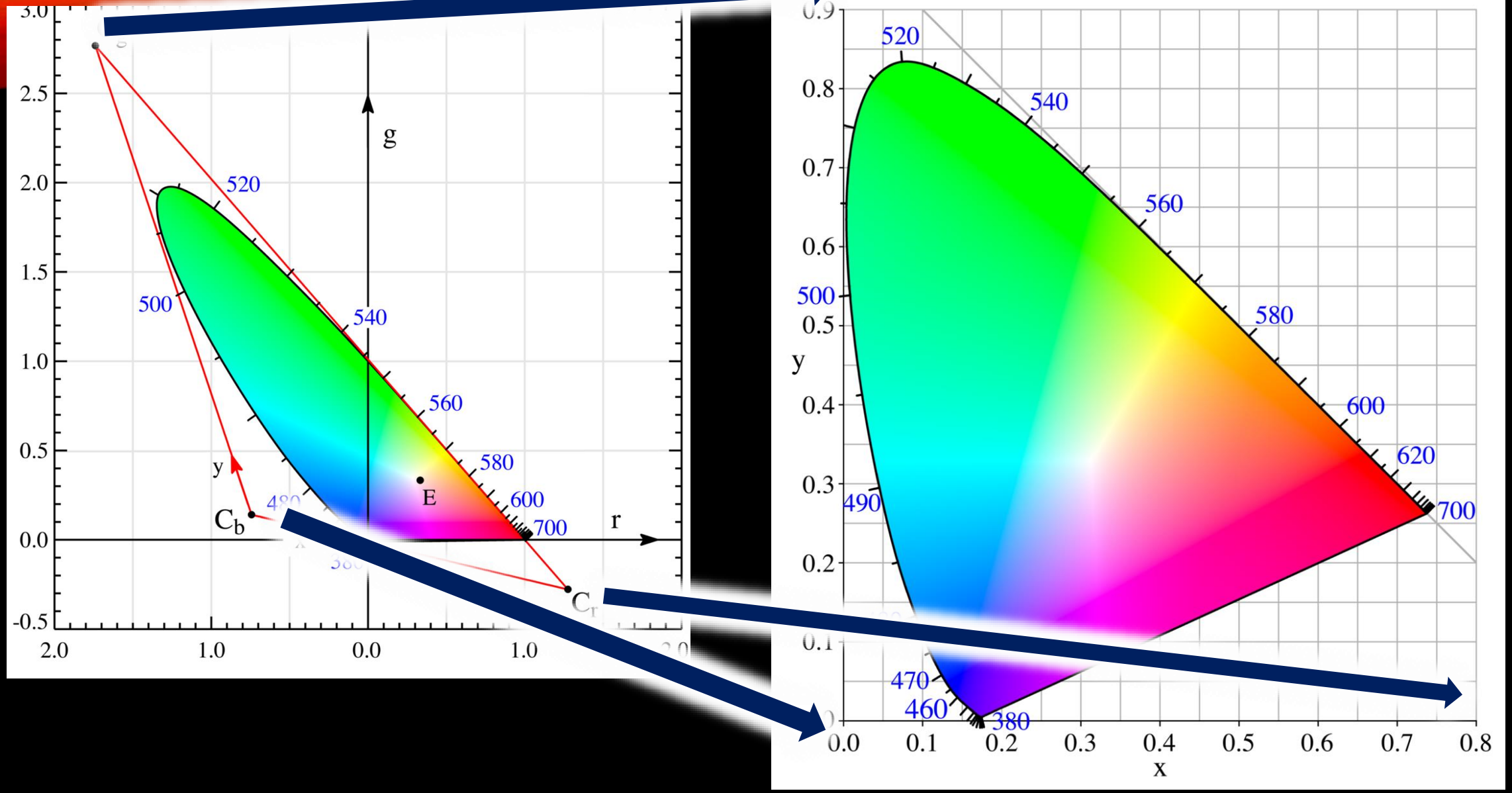
- $r = R \div (R + G + B)$
- $g = G \div (R + G + B)$
- $b = B \div (R + G + B) = 1 - r - g$



仮想頂点を作る

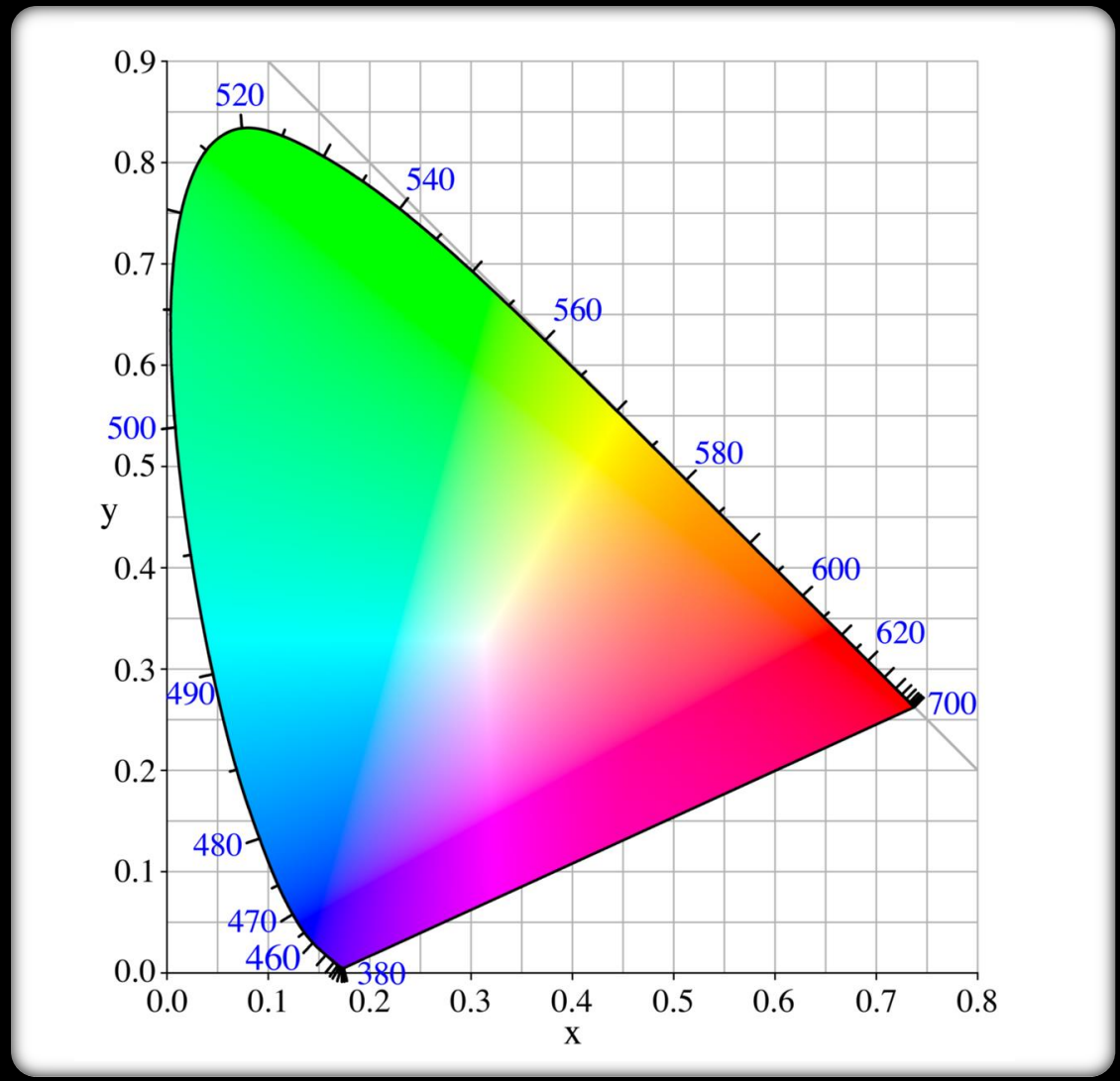
Cr, Cg, Cb で
新しく三角形を作る。




g
r
520
500
540
560
580
600
700
E
C_b
C_r
y
x
490
470
460
380
620

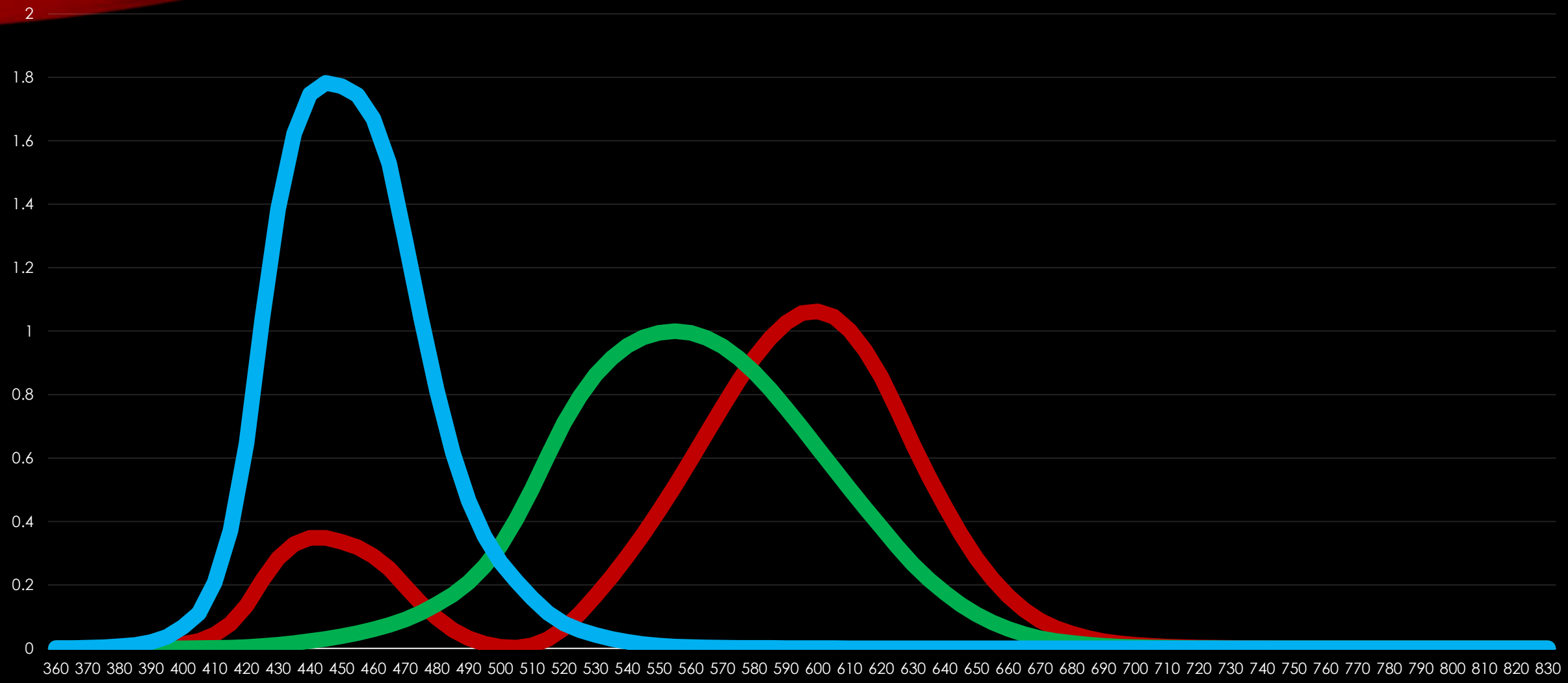
結果

- 見たことある!!
- なるほど。

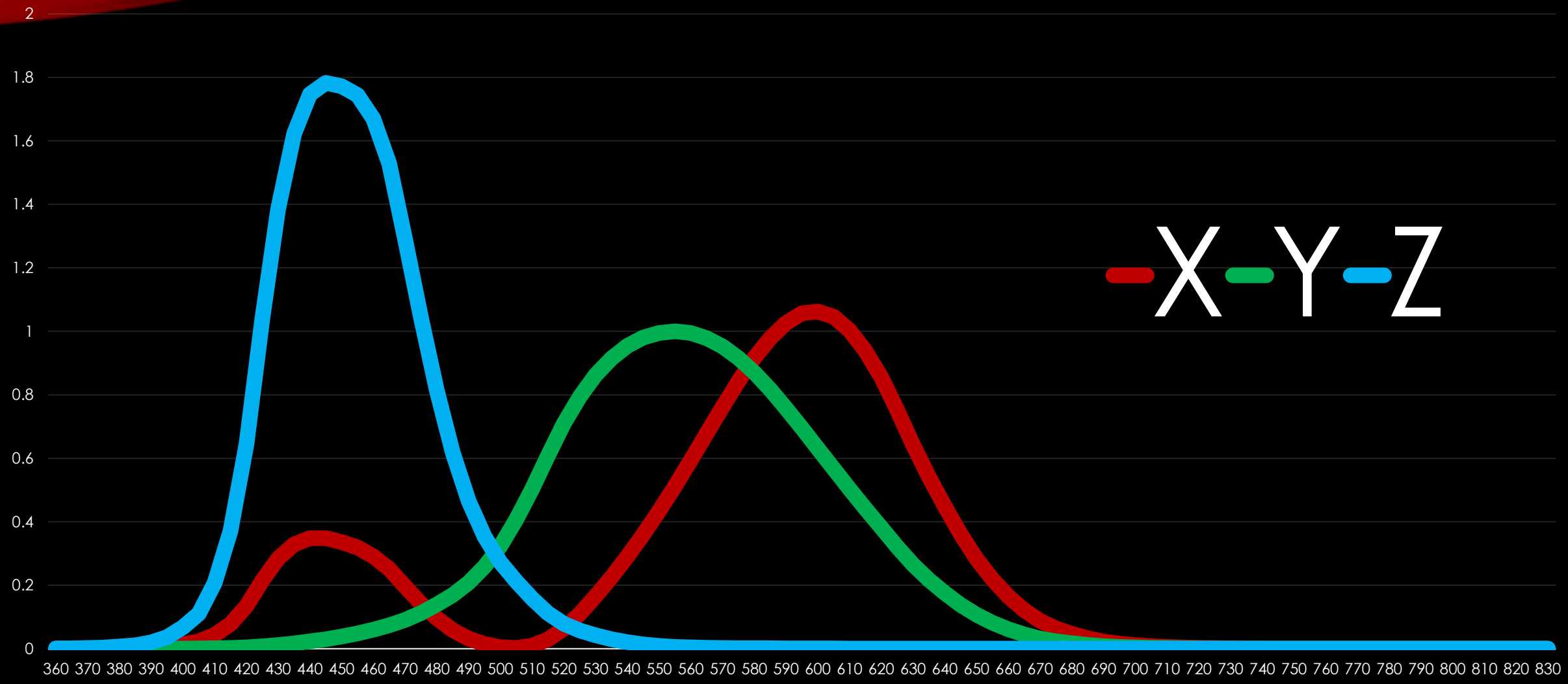


等色関数はどうなった？

CIE XYZ 1931 2-deg CMFs



CIE XYZ 1931 2-deg CMFs



CIE XYZ 1931 2-deg CMFs
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
360 370 380 390 400 410 420 430 440 450 460 470 480 490 500 510 520 530 540 550 560 570 580 590 600 610 620 630 640 650 660 670 680 690 700 710 720 730 740 750 760 770 780 790 800 810 820 830
-X-Y-Z
no more 負

なんでXYZ？

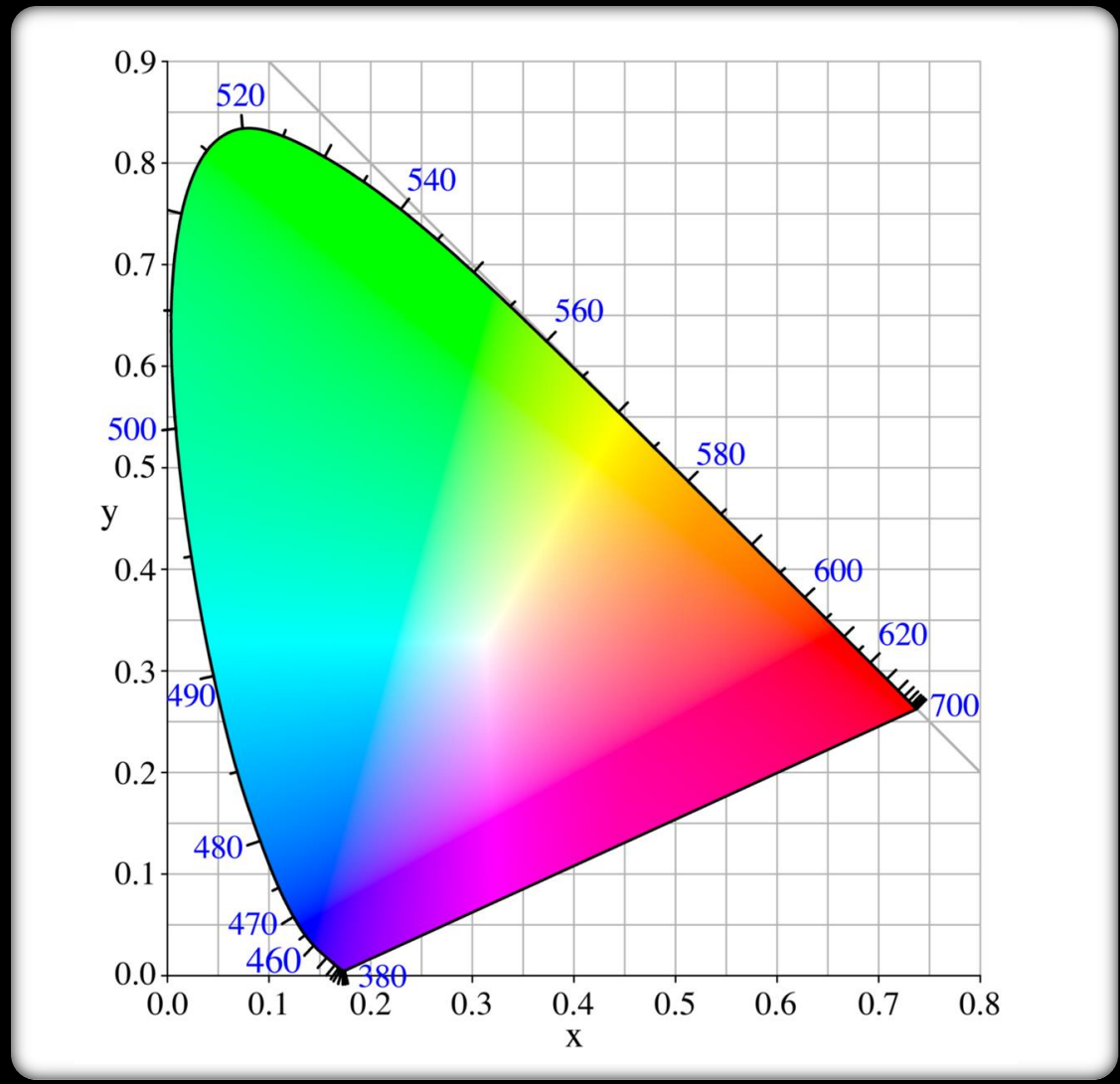
- 線形変換した結果、原色が知覚できない色になった。
- 「虚色」

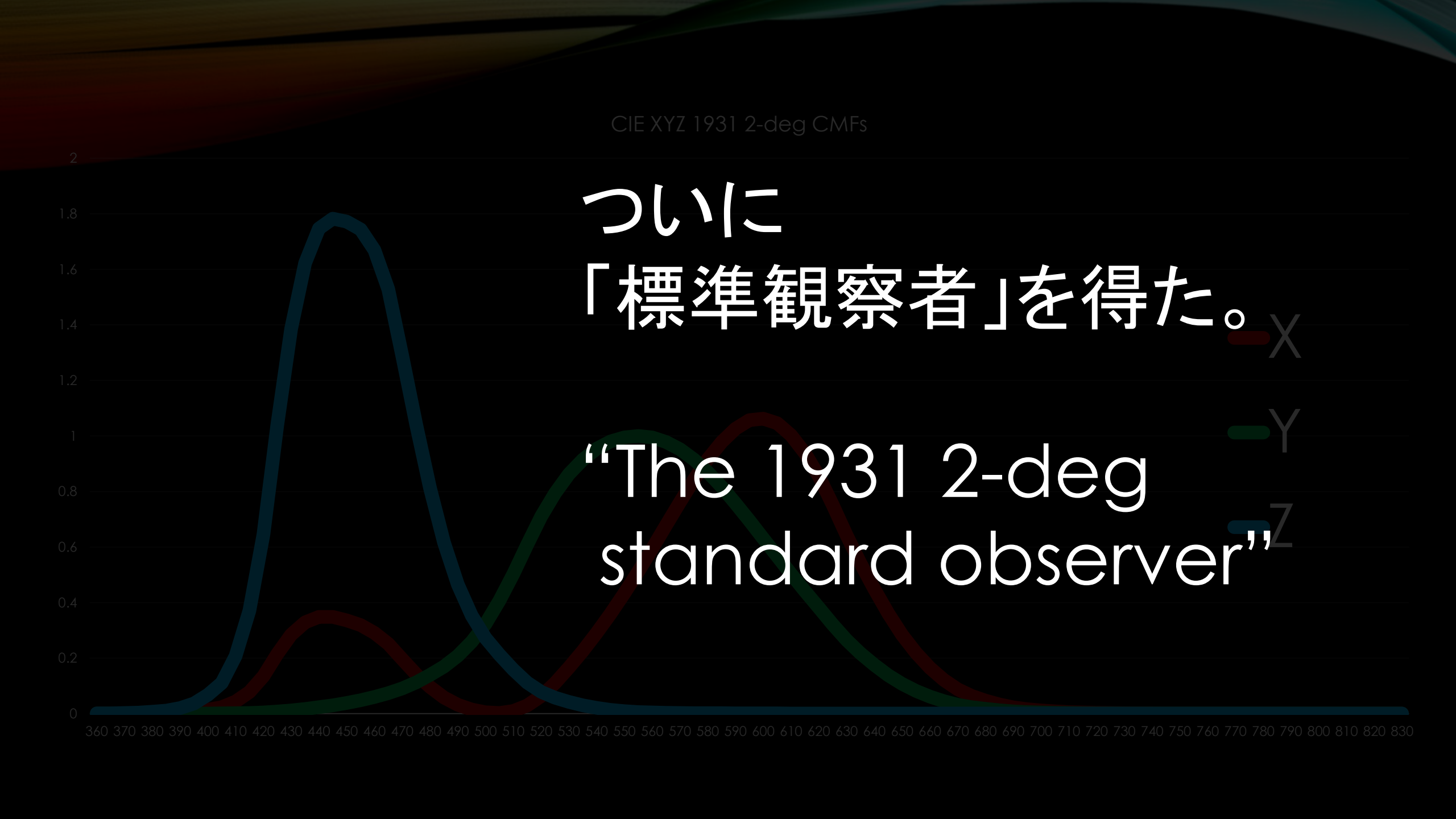
- 「原色」ではなく、「原刺激」と呼ぶ。
- 実在しない色なので X,Y,Z の文字をあてた。

“xy色度図”

- x = X / (X+Y+Z)
- y = Y / (X+Y+Z)
- z = Z / (X+Y+Z)

- (x,y)と色を対応させた図。
- 超メジャー
- 「xy色度図」
- z = 1-x-y





ついに
「標準観察者」を得た。

“The 1931 2-deg
standard observer”

CIE1931 XYZ色空間での三刺激値は

$$X = \int C(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda$$
$$Y = \int C(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda$$
$$Z = \int C(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda$$

これが “CIE 1931 XYZ 色空間”

3. 色空間

色空間(COLOR SPACE)

- 「色空間」: 色を表記する座標系
- 種類がたくさんある。
- CIE 1931 XYZ, sRGB, AdobeRGB, etc…

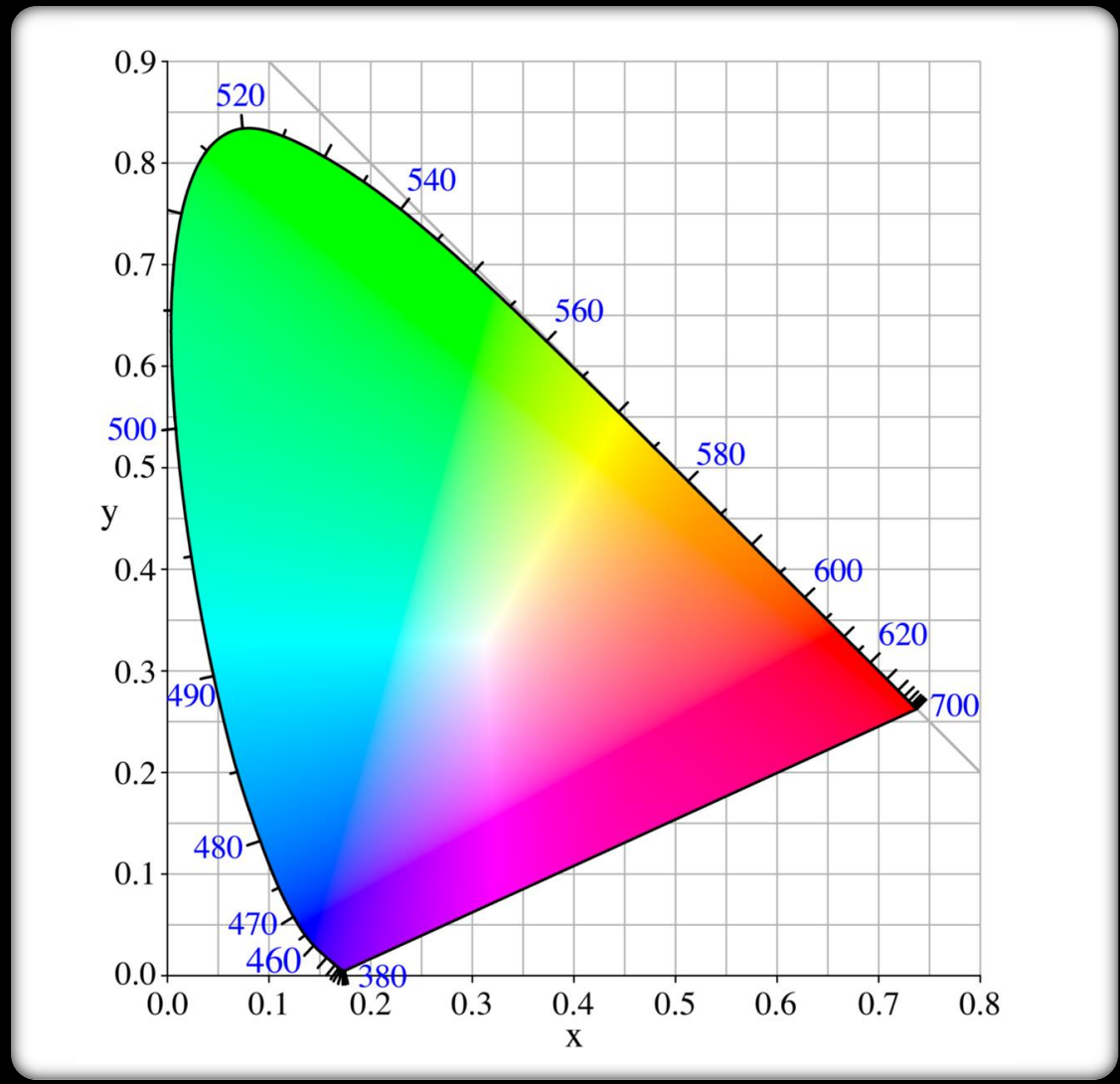
色域(COLOR GAMUT)

- 「色域」: ある色空間が表現できる色の範囲
- 光は負にならないので、
  原色より鮮やかな色を出すことはできない。
- 色域は、色空間の原色で決まる。

CIE1931XYZ色空間

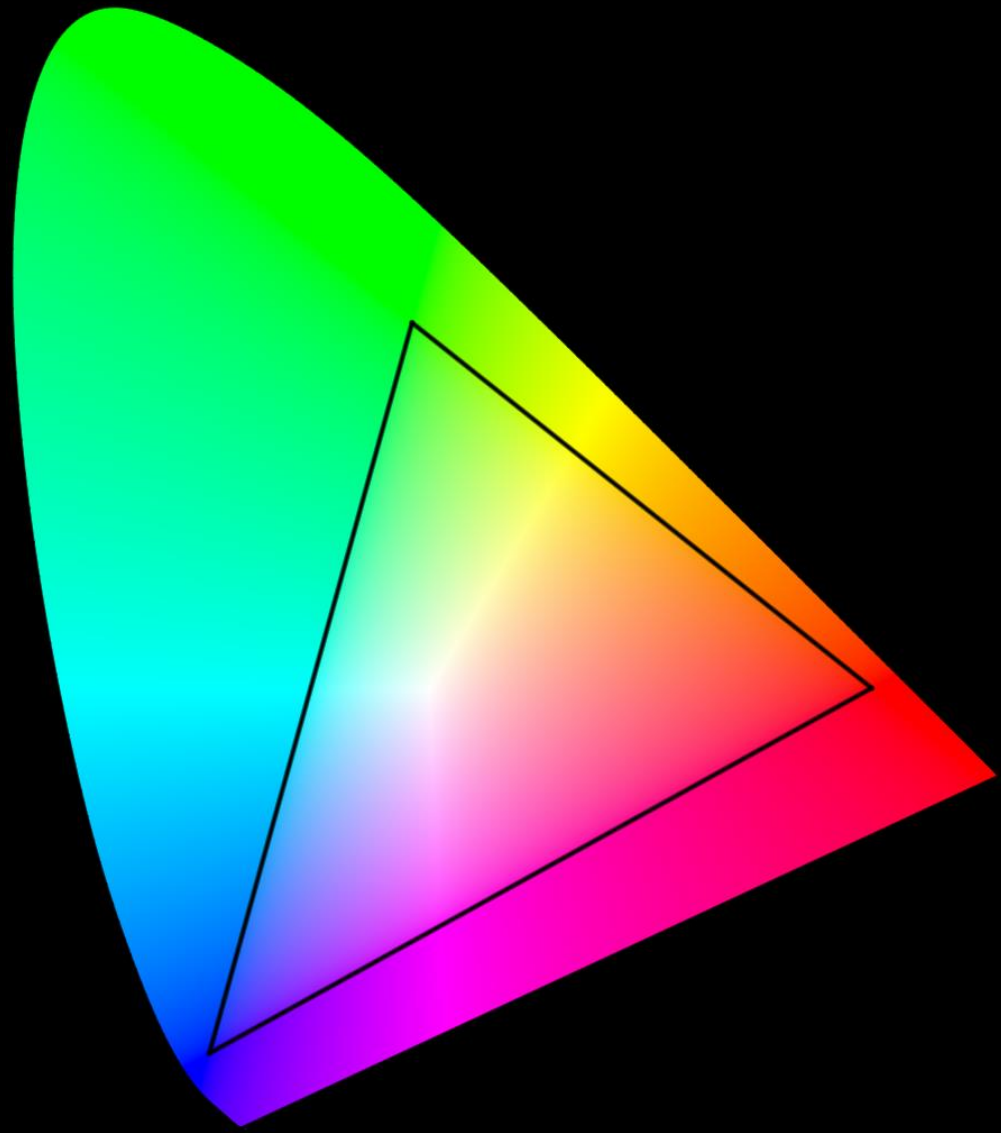
全ての色を含む。
→ 色域が最も広い

様々な色空間の
大元になる色空間。



sRGB色空間

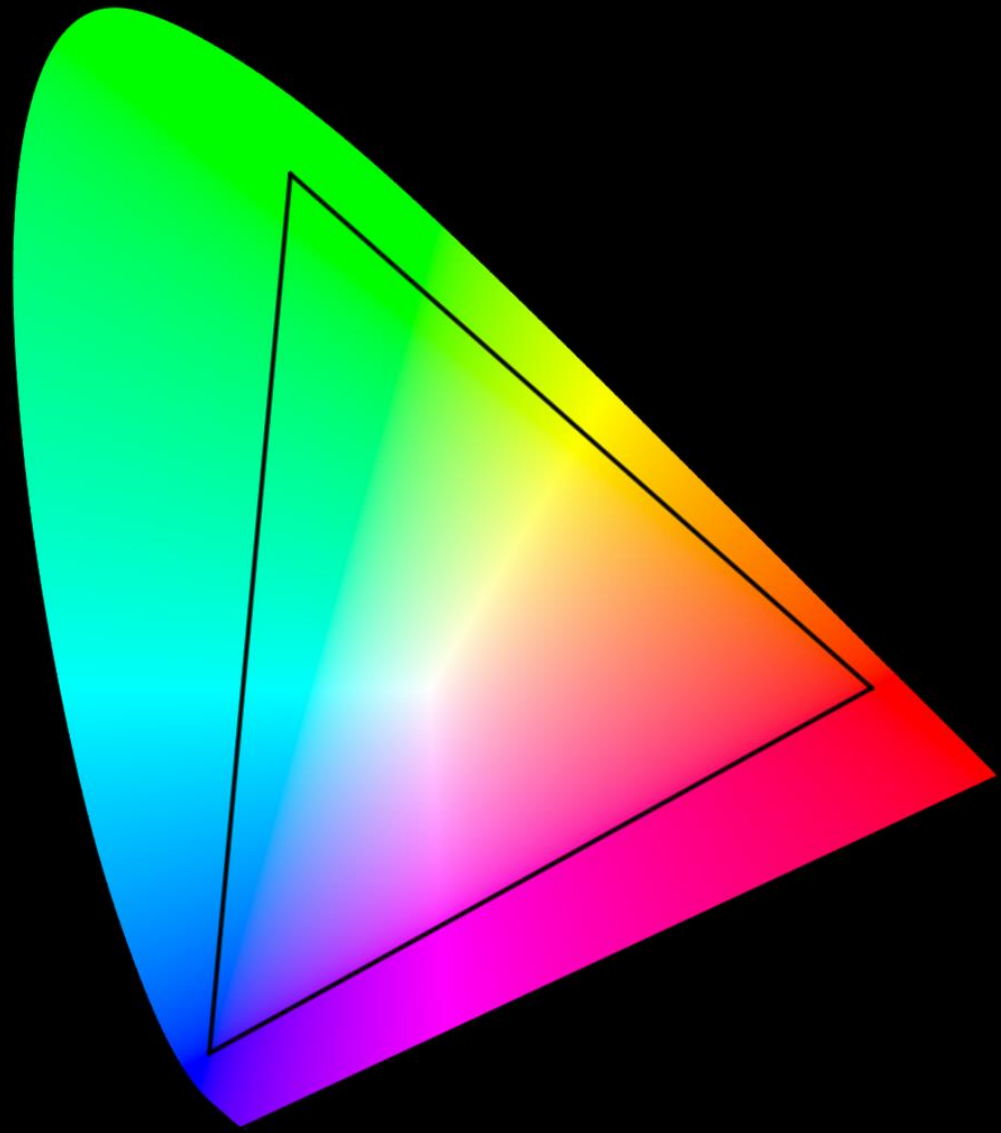
PCモニターの標準。
デジカメでも標準。
色域が狭い。



AdobeRGB色空間

sRGB色空間よりも、緑が広い。
規定がとても細かい。

青と赤はsRGBと同じ。



データとモニタの色空間が違うと色が正しく再現されない。

XYZ色空間の写真データ

sRGB色空間の写真データ

色空間を相互変換する必要がある。

XYZが基本

多くの色空間は、XYZ色空間との相互変換ができる。

XYZ色空間を経由して、
ある色を他の色空間に変換することができる。

sRGB と XYZ の変換を導出してみよう。

sRGB

sRGBの色空間は、白、赤、緑、青の4色のxy色度で規定されている。

sRGB>XYZ

	W	R	G	B
x	0.3127	0.64	0.30	0.15
y	0.3290	0.33	0.60	0.06

sRGB>XYZ

	W	R	G	B
x	0.3127	0.64	0.30	0.15
y	0.3290	0.33	0.60	0.06

$z = 1 - x - y$ なので

sRGB>XYZ

	W	R	G	B
x	0.3127	0.64	0.30	0.15
y	0.3290	0.33	0.60	0.06

$z = 1 - x - y$ なので

	W	R	G	B
x	0.3127	0.64	0.30	0.15
y	0.3290	0.33	0.60	0.06
z	0.3583	0.03	0.10	0.79

sRGB>XYZ

XYZ値とRGB値の関係は以下のような行列で表せる。
最初の行列はR,G,Bそれぞれのxyz色度座標。
Sr Sg Sb は白を一致させるためのスケーリング。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_r & 0 & 0 \\ 0 & S_g & 0 \\ 0 & 0 & S_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

sRGB>XYZ

sRGBにおける白は (R G B)=(1 1 1)

	W	R	G	B
x	0.3127	0.64	0.30	0.15
y	0.3290	0.33	0.60	0.06
z	0.3583	0.03	0.10	0.79

同じ白が XYZ色空間では k(0.3127 0.3290 0.3583) ただし kは変数

sRGB>XYZ

Y=1になるように白のXYZ座標を正規化する

	W	W(Y=1)
x	0.3127	0.950456
y	0.3290	1.000000
z	0.3583	1.089058

sRGB>XYZ

以上から、

$$\begin{pmatrix} 0.950456 \\ 1 \\ 1.089058 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.64 & 0.30 & 0.15 \\ 0.33 & 0.60 & 0.06 \\ 0.03 & 0.10 & 0.79 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_r & 0 & 0 \\ 0 & S_g & 0 \\ 0 & 0 & S_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

sRGB>XYZ

よって

$$\begin{pmatrix} S_r \\ S_g \\ S_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.644361 \\ 1.19195 \\ 1.20321 \end{pmatrix}$$

sRGB>XYZ

求まった値を代入して、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.64 & 0.30 & 0.15 \\ 0.33 & 0.60 & 0.06 \\ 0.03 & 0.10 & 0.79 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.644361 & 0 & 0 \\ 0 & 1.19195 & 0 \\ 0 & 0 & 1.20321 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

sRGB>XYZ

結果、以下のような式を得られる。

$$\begin{pmatrix} \mathrm{X} \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.412391 & 0.357585 & 0.180482 \\ 0.212639 & 0.71517 & 0.0721926 \\ 0.0193308 & 0.119195 & 0.950536 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \mathrm{R} \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.24097 & -1.53738 & -0.498612 \\ -0.969241 & 1.87596 & 0.0415554 \\ 0.0556299 & -0.203976 & 1.05697 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

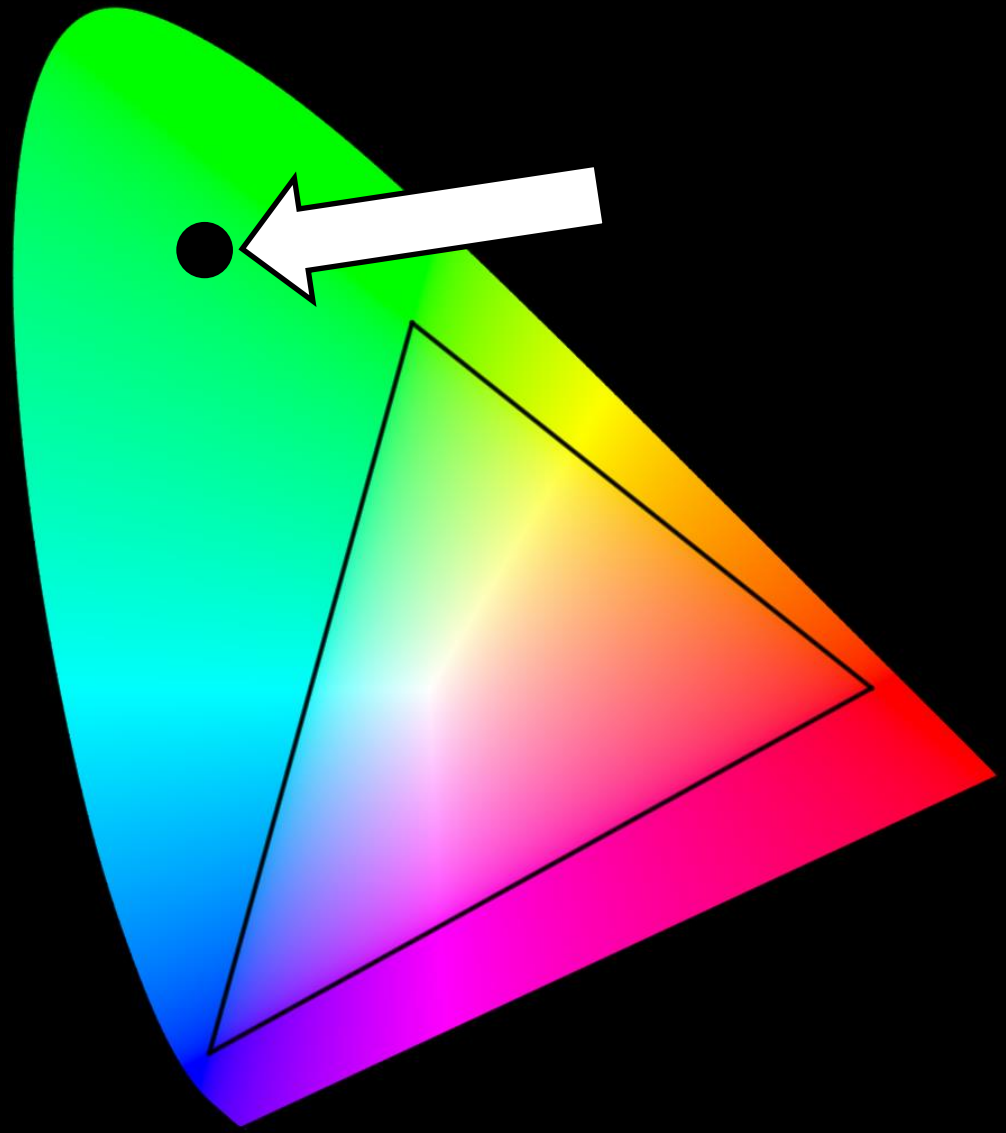
導出が大事

- 色空間の変換行列はネットに山のようにあるが、
  間違っていることが多い。

- 自分で導出しなおすことも時には大事。

XYZ色空間との相互変換が
できるようになった。

色域外の色の扱い



色域外色

- 例えばXYZ色空間 (0.1 , 0.7, 0.2) の色は、sRGBの色域外の色。
- これをsRGB色空間に変換してみると、

$$\begin{pmatrix} 3.24097 & -1.53738 & -0.498612 \\ -0.969241 & 1.87596 & 0.0415554 \\ 0.0556299 & -0.203976 & 1.05697 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.7 \\ 0.2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.851791 \\ 1.22456 \\ 0.0741738 \end{pmatrix}$$

- 色域外の色を変換すると、負の値や、1以上の値が出てくる。
- 値をクリップしてしまうと、元の色に戻せなくなる。

これで小難しい話はおしまい！

- 後半はリラックスしていきましょう。

4.色の計測とデバイス

色を計測するには、分光測定器が必要

- 物体色 = 光スペクトル * 分光反射率
- 光源色 = 光スペクトル

まずは光源色を知りたい

光源色の測定

- 分光放射輝度計
  - 放射輝度が計測できる。
  - とても高い。

引用 http://organic.yz.yamagata-u.ac.jp/equipment.html

分光放射輝度計

- 最強

引用 http://organic.yz.yamagata-u.ac.jp/equipment.html

光源色の測定

- 最強
- 欲しい。

もう少しリーズナブルな製品は？

分光放射照度計

- 比較的安い。
- 導入しやすい。

http://www.sekonic.co.jp/product/meter/c_700/c_700.html

分光放射照度計

- ディフューズ半球がついていて、輝度が計測できない。
- 製品によってはCSVで保存できない。
- 精度がピンキリ

http://www.sekonic.co.jp/product/meter/c_700/c_700.html

輝度と照度

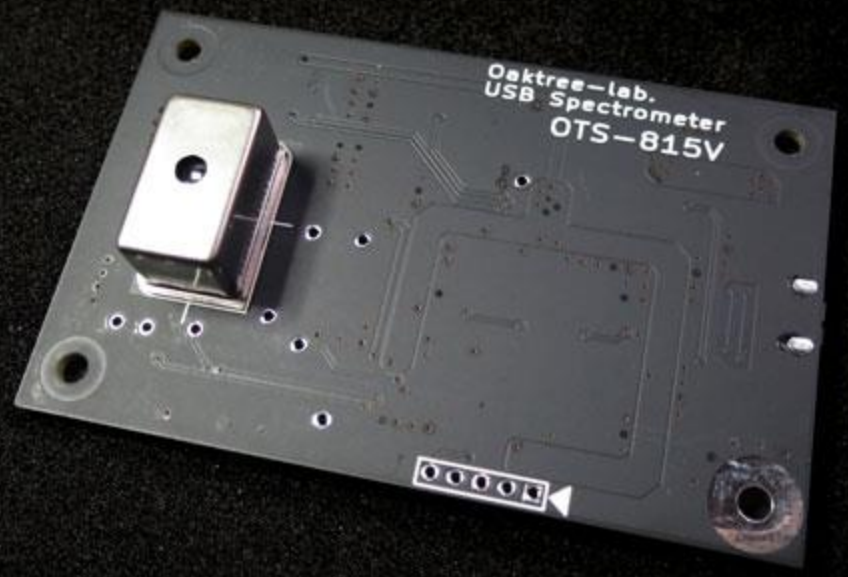
- 輝度：ある立体角から来る光の強さ

輝度と照度

- 照度：ある平面が照らされる強さ

分光センサーだけの製品も

- 浜ホトのセンサーがほぼそのままUSBに繋がる
- 出力は比エネルギー
- 自由度と精度がとても高い。
- 一説にはHORIBAレベル



http://oaktree-lab.com/products/ezSpectra.html

分光デバイスまとめ

- どれでもいいので、とにかく一個入手するべき。
- 色に関して、できることが圧倒的に増える。

光源

光がないと物体色が取れない

- 物体色 = 光源スペクトル * 分光反射率

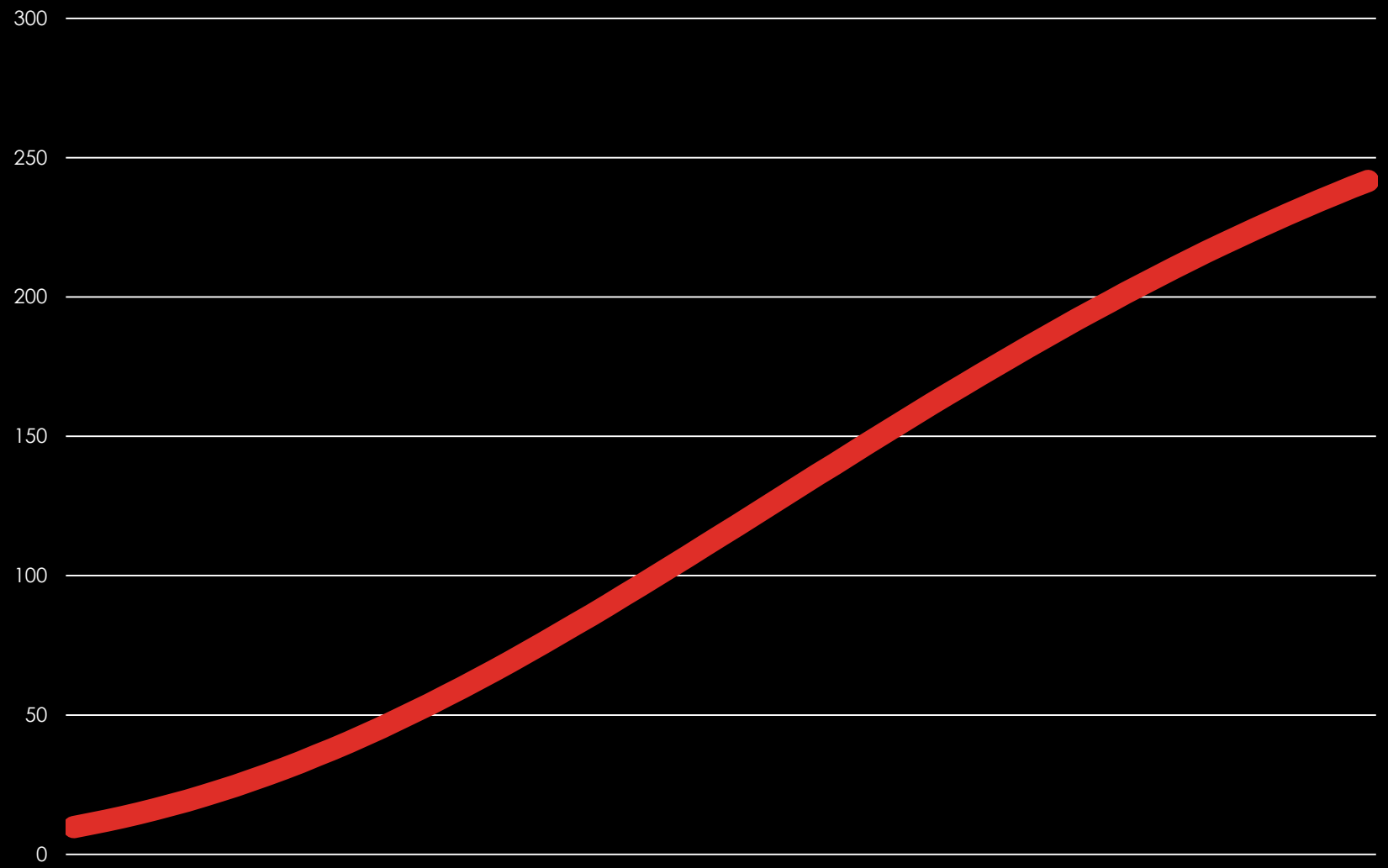
- 物体色を計測するためには、光源が必須。
- しかもスペクトルが既知である必要がある。

標準光源

- CIEがスペクトルまで含めて策定している光源がある。
- 「標準光源」と呼ばれる。

A光源

- 熱電球の光
- とても赤い

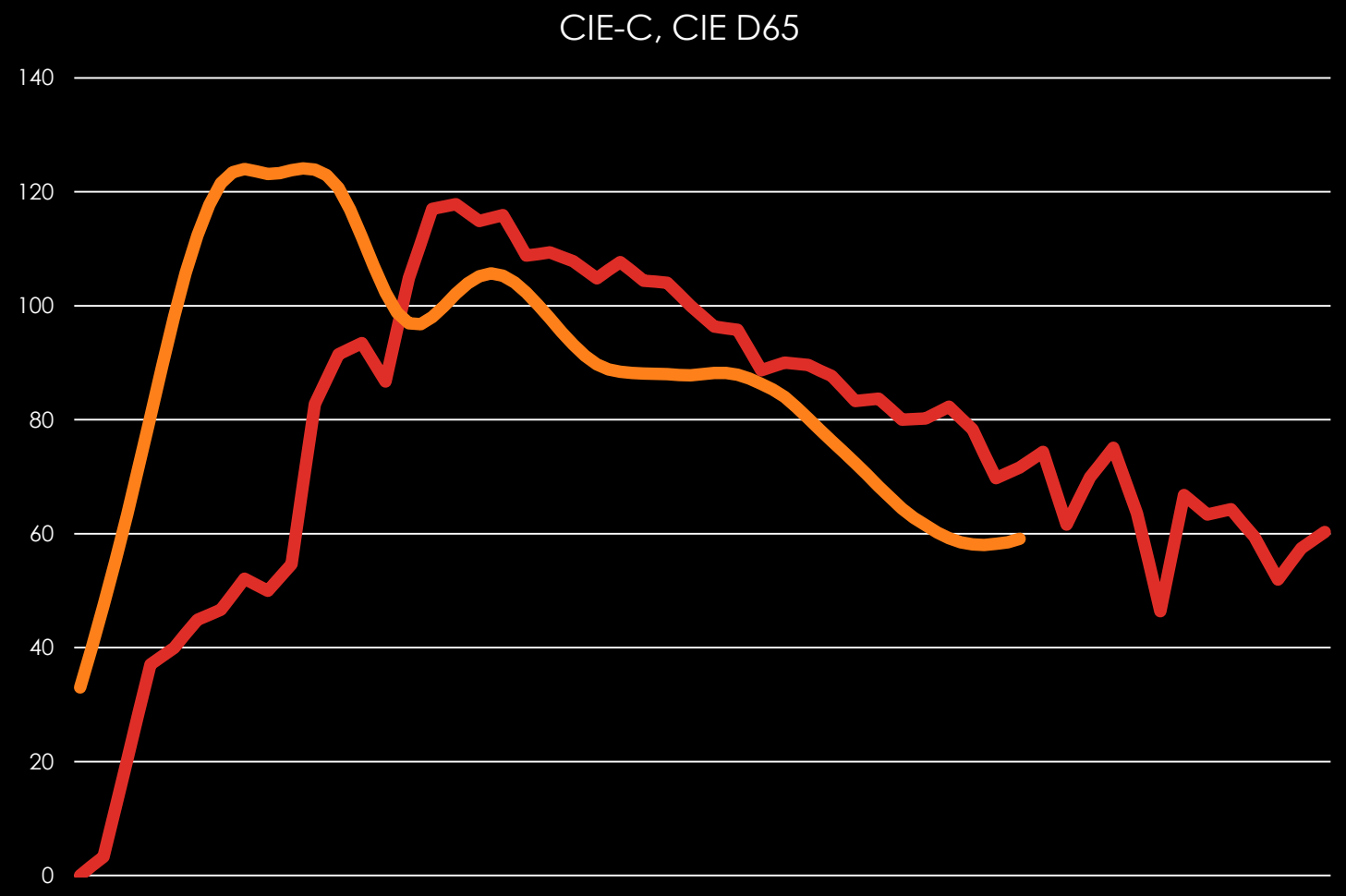


C光源, D光源

- 模擬太陽光
- C光源は青空の色
- D光源は太陽の色

- “65”は色温度6500Kの意味。

- どちらも紫外線を含む。
- D光源は再現できる機材がない



黒体放射

- Planckの黒体放射スペクトルは、ほぼD光源と同じ色度なので良く代用される。

$$I(\lambda[nm], t[K]) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad [W/sr\ m^2\ nm]$$

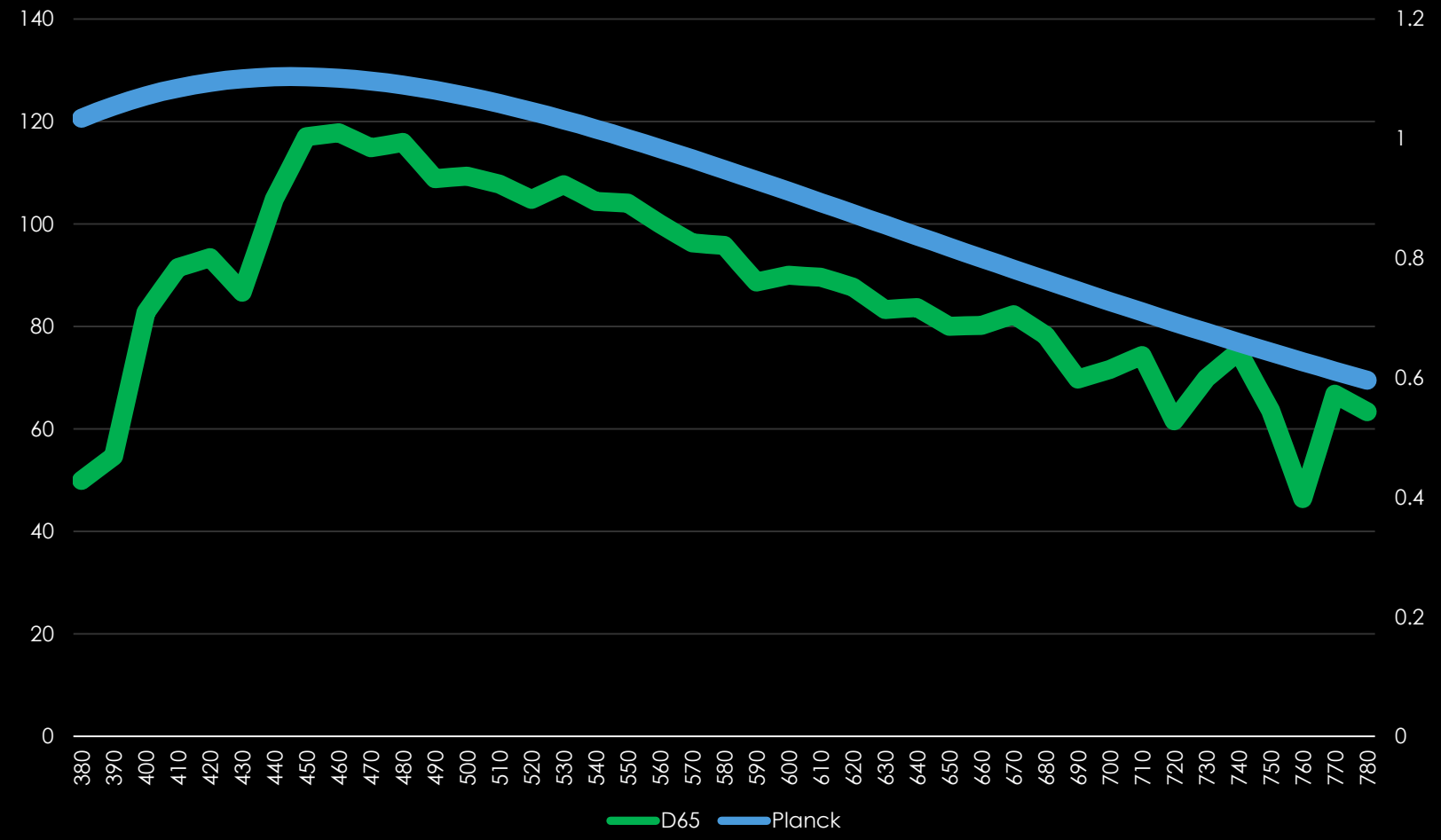
- 555nmの値を1に正規化して使うことが多い。

- 黒体放射スペクトルのxy色度図上の軌跡を、「黒体放射軌跡」と呼ぶ。
- UV色度図上で最も近い黒体放射温度を「色温度」や「CCT」と呼ぶ。

6500Kにおける比較

- 概形が一致。
- xy色度もほぼ一致。

- D65 / 0.312712 0.329008
- 黒体 / 0.313525 0.323627

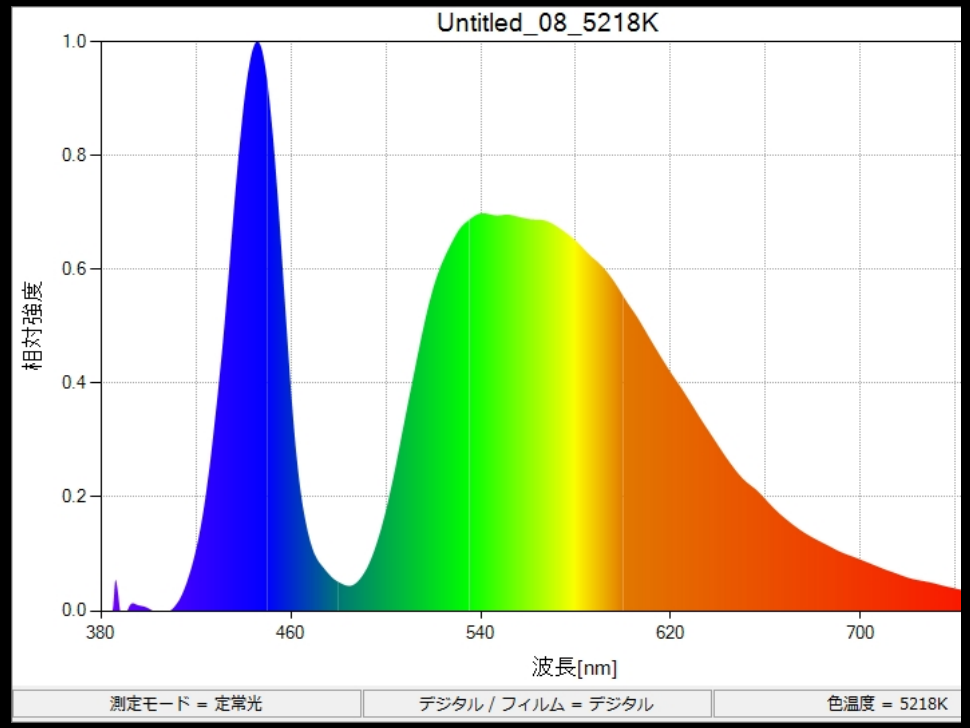


なぜ標準光源が良いのか？

- 演色性が高いから。
- 演色性の低い光源下では
  正しく色が計測できない。

http://www.tlt.co.jp/tlt/products/home_lighting/home_led/led_ceiling/kireiro/kireiro.htm
より引用

低演色ライトの例



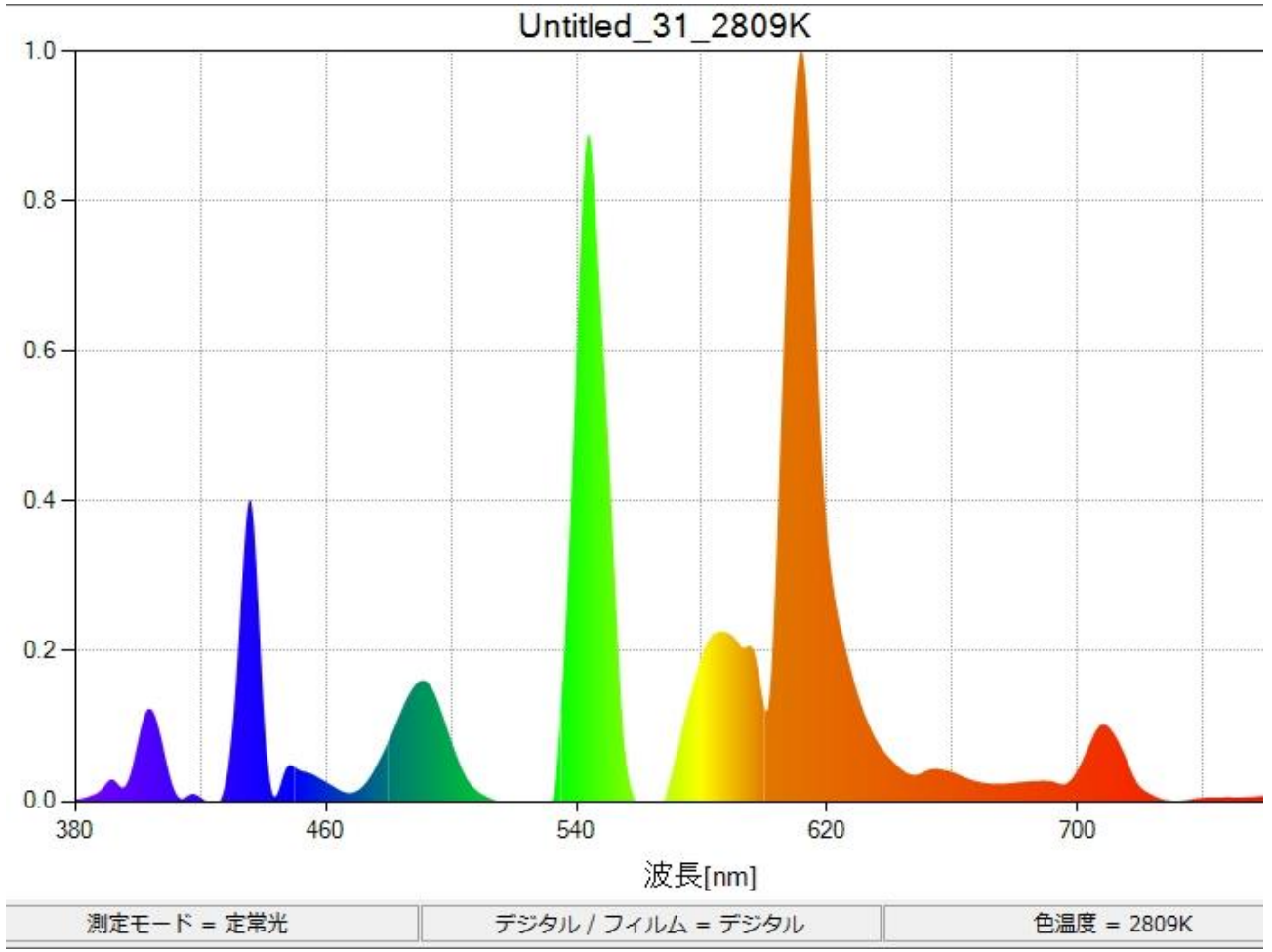
- 蛍光灯型LEDランプの例。
- スカスカスペクトル
- 目には白く見える。(青+黄)

- こんなライトでテクスチャを撮影していたら…

3波長蛍光灯

- 3ピークしかない
- R9(赤演色)が計算不能
- オフィスの蛍光灯

- こんなライトで
  色を見ていたら…



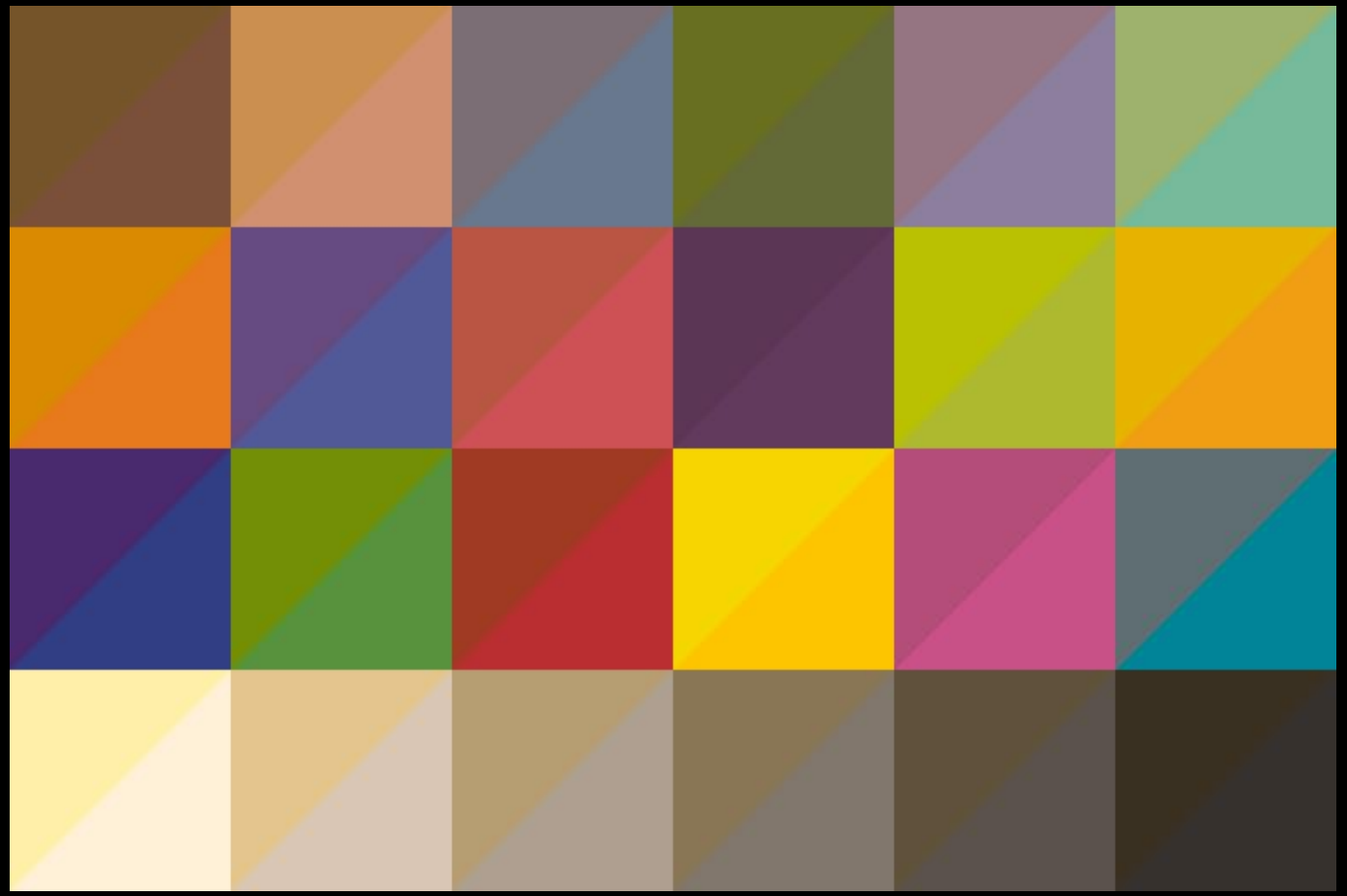
やってみた。

- カラーチャートの分光反射率を計測した光源スペクトルでライティングしsRGBに変換した色と
  最も近い色温度の黒体放射スペクトルで同様にライティングしsRGBに変換した色を比較。

3波長蛍光灯の色
(シミュレート)

左上が計測光源(低演色)
右下が黒体放射(高演色)

同じ色温度に調整してあり
同じ色になるはずだが、
ならない。



低演色な光源はダメ。本当に。

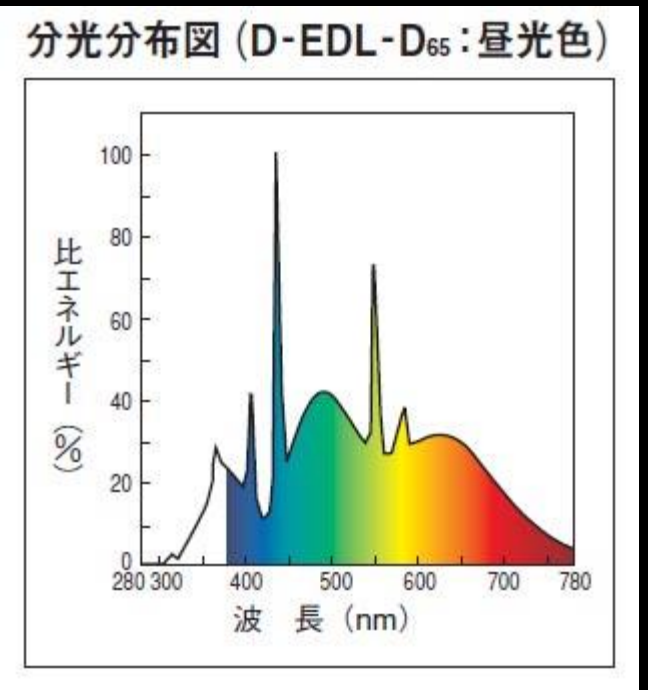
- テクスチャ撮影はもちろんダメ。
- モニターのマテリアルと
  手元のマテリアルを見比べるのもダメ。

じゃあどんな光源がいいの？

- 標準光源はとにかくコストが高い。

- できるだけ似ているスペクトルの光源で代用する。
- 「実用標準光源」

色評価蛍光灯



- D65光源と同じXYZ値になるように調整された蛍光灯。
- 蛍光灯としては高額。
- 機材としてはとても安価。
- オフィスの蛍光灯を全部これにしたい。
- けっこう暗い。

これも使えるかも

- 植物育成ライトでRa95を唄う製品。
- かなり安価。
- 実物は少し赤LEDの指向性が強かった。
- バウンス照明にしたら解決。
- スタンドがテクスチャ撮影に便利。
- D65ではないので色補正が必要。

物体色を計測する

物体色の計測

- 物体色は、つまり、分光反射率。
- 分光反射率 = 観察光スペクトル / 光源スペクトル
- 光源のスペクトルと、観察されたスペクトルを
  計測すれば、物体色が求まる！

放射照度計しかない場合

- 放射照度計しかなくて、反射光を分光計測できない場合。
- 分光反射率の測定は諦める。

- それでも、XYZ色空間での反射率は計算できる。

- 反射率XYZ = 観察光XYZ / (光源*CIE1931XYZ)

ここまでのまとめ

- 分光計測機が選定できるようになった。
- 高演色な光源が選定できるようになった。
- 組み合わせて、物体の色が計測できるようになった。

毎回これはつらい！

- 取材のたびに、分光器を持っていくのは無理がある。
- 取材先で、光源や電源が準備できないことも多い。

- もっと簡単にできる方法はないの？

カメラを用いた色計測

なぜカメラ？

- ゲームに使う素材はカメラで撮るから。

- テクスチャやマテリアルの色を正確に撮影したい。
- つまり、カメラの色を正確に補正したい。

どうする？

撮影結果RGB = XYZからカメラ色空間(撮影対象XYZ)

どうする？

「XYZからカメラ色空間の変換行列」を求めれば良い。

RAW.

- 撮影RGBとは、RAW画像の画素値のこと。

- dcrawやlibrawでデコードできる。
- dcrawのオプションで色変換をオフにする。

どうする？

撮影結果RGB = XYZからカメラ色空間(撮影対象XYZ)

撮影結果RGBは求まった。
撮影対象XYZを求めたい。

既知の色で、未知を知る

撮影結果XYZ = CIE1931XYZ * 分光放射輝度。
分光放射輝度 = 物体色 * 光源色。

既知の色で、未知を知る

つまり

- 既知の光源
- 既知の物体色

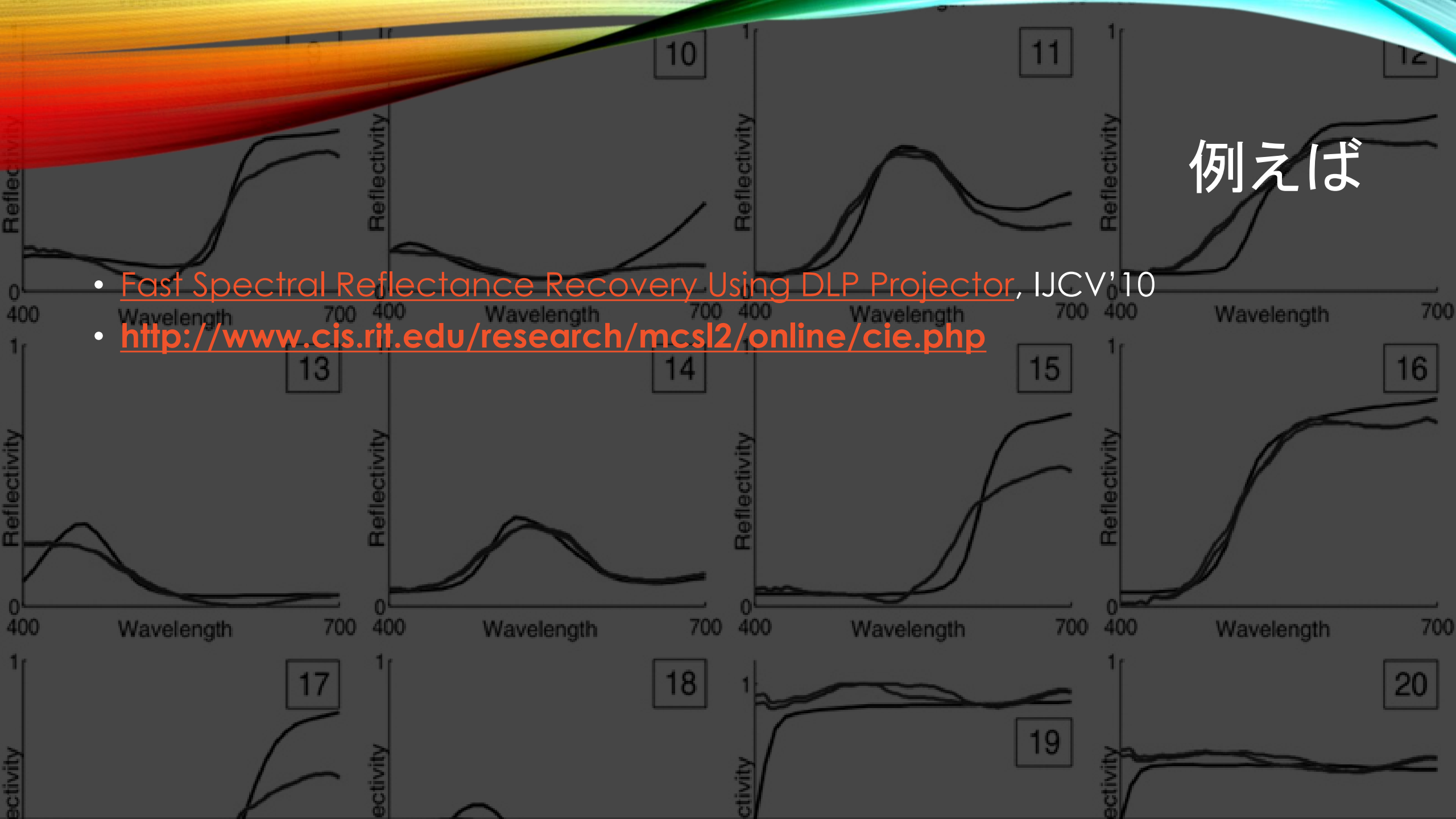
を用意してやれば、未知のカメラ色空間が求められる。

既知の色？

COLOR CHECKER!

- カラーチェッカーを使う。
- 各パッチは
  分光反射率が既知。
- 各パッチは正確に
  調色されている。

例えば



- Fast Spectral Reflectance Recovery Using DLP Projector, IJCV'10
- **http://www.cis.rit.edu/research/mcsl2/online/cie.php**

カラーチャートを撮影。
同時に光源の
スペクトルを計測。

カメラ行列を計算する

- 撮影結果RGB = XYZからRAW変換 * パッチXYZ

- XYZからRAW変換 は、通常3x3の行列で十分。

- 変な色空間のカメラは、そもそも正しい色が撮れない。
- カメラとして市販されていれば、ある程度普通の色空間のはず。
- 「ルータ条件」

カメラ行列を計算する(2)

- 光源のスペクトルから、本来のカラーチャートのXYZが求まる。
- それを元に、ガウスザイデルで XYZ_to_RAW を求める。
- 逆行列 (RAW_to_XYZ) も容易に求まる。

- この行列こそ、求めていたモノ。

カメラ行列を計算する(3)

- 測定した光源スペクトルの代わりに、
  標準光源や任意の色域でのパッチを代入してみる。
- 例えばsRGB。

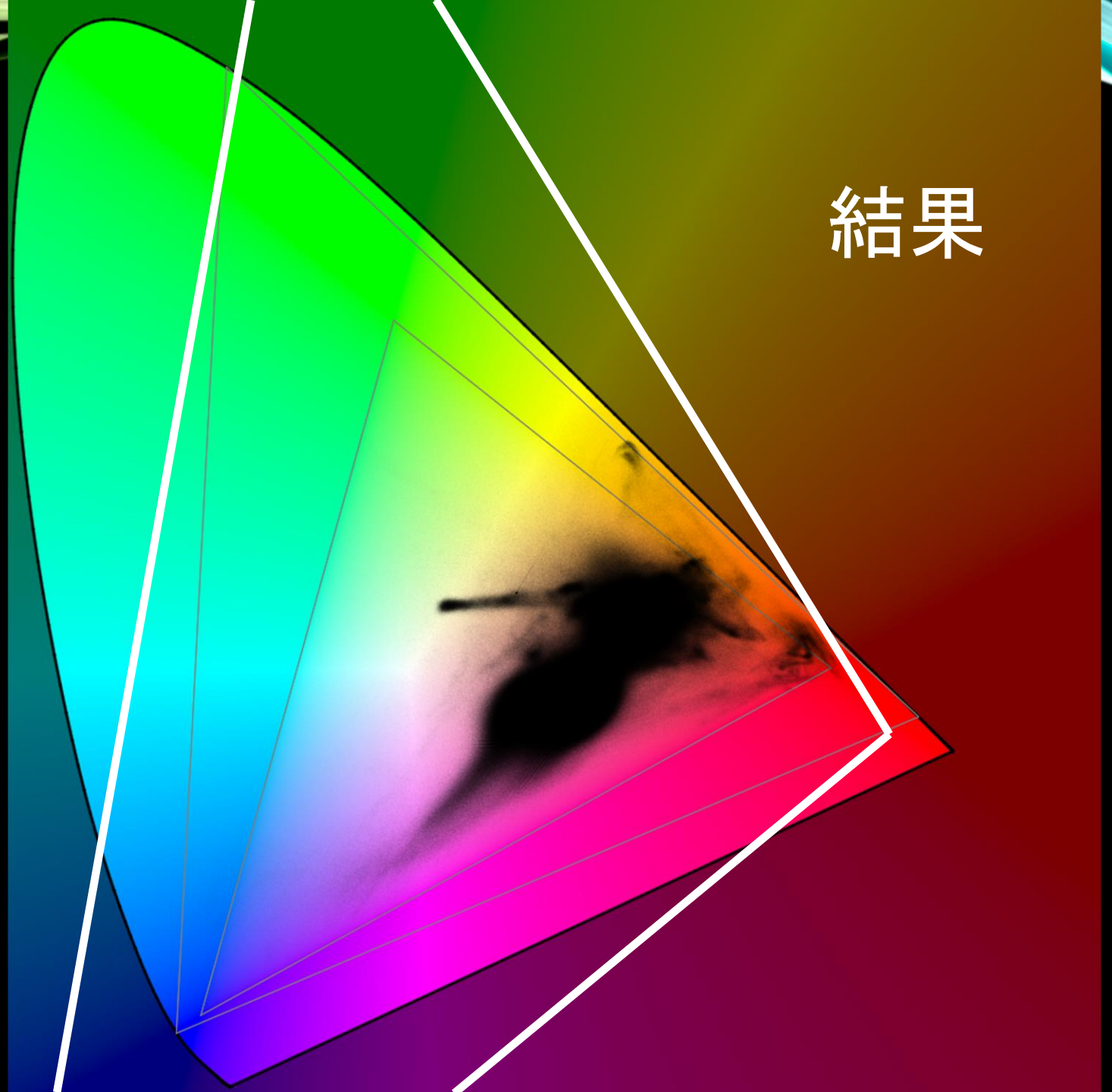
- すると、sRGBからRAWへの変換行列を得られる。
- 逆行列を求めれば、RAWからsRGBへの直接変換ができる。

- 光源の影響をキャンセルすることができる。

結果

- とあるカメラのRAWの例
- 白い線が色空間

sRGBよりも圧倒的に広い！



複数カメラ間の色

- 複数のカメラ機種で、全て同様にXYZへの変換行列を求める。
- XYZ色空間は相互に共通なので、カメラ間の色は全て一致する。

- 現実のセンサーはルータ条件をわずかに満たさないので、
  一部に色ズレが出てしまうことはある。

ここまでのまとめ

- カメラの色空間をリバースエンジニアリングできるようになった。
- 撮影画像から光源の影響を除去できるようにもなった。
- カメラが簡易色彩計になった！

ここまでのまとめ

- 常にカラーチャートが手放せなくなった…

5.レンダリングと色の出力

レンダリング色空間

- せっかくだから、一番広い色域のXYZで
  レンダリングしちゃえばいいんじゃないの？

XYZ色空間でレンダリングは
実はあまり良くない。

比較

- カラーチャートをレンダリングして比較する
- 差のわかりやすい、2000Kの黒体光源

フルスペクトルレンダリング 計算内容

- 光源：黒体放射スペクトル E(λ)
- 物体：分光反射率スペクトル R(λ)
- 観察者:CIE1931等色関数$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$

$$C_{sRGB} = M_{XYZ2sRGB} \begin{pmatrix} \int E(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ \int E(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ \int E(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{pmatrix}$$

XYZ色空間レンダリング計算内容

$$E_{xyz} = \begin{pmatrix} \int E(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ \int E(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ \int E(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{pmatrix}, R_{xyz} = \begin{pmatrix} \int R(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ \int R(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ \int R(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{pmatrix}$$

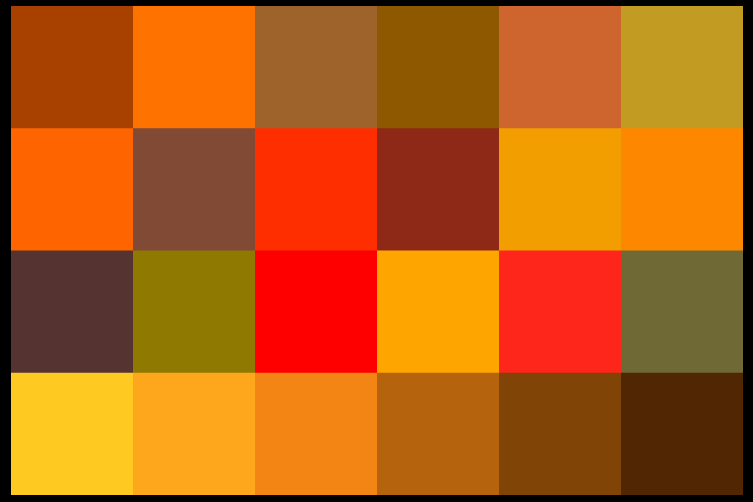
$$C_{sRGB} = M_{XYZ2sRGB}(E_{xyz} * R_{xyz})$$

sRGB色空間レンダリング計算内容

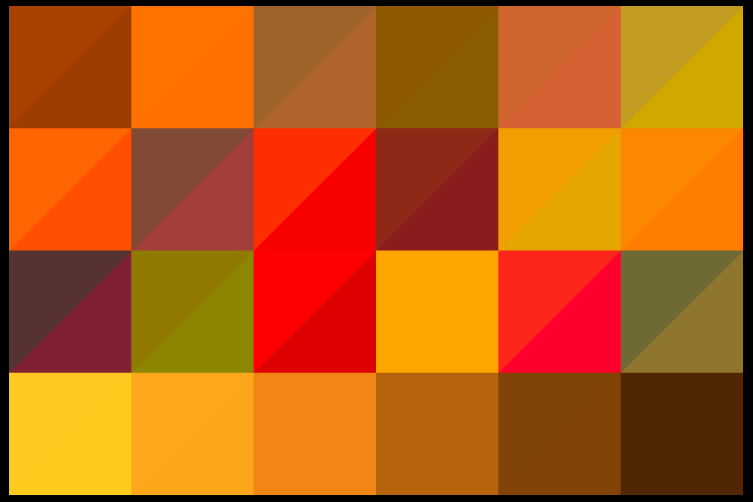
$$E_{sRGB} = M_{XYZ2sRGB}\begin{pmatrix}\int E(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ \int E(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ \int E(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda\end{pmatrix}, \qquad R_{sRGB} = M_{XYZ2sRGB}\begin{pmatrix}\int R(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ \int R(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ \int R(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda\end{pmatrix}$$

$$C_{sRGB} = E_{sRGB} * R_{sRGB}$$

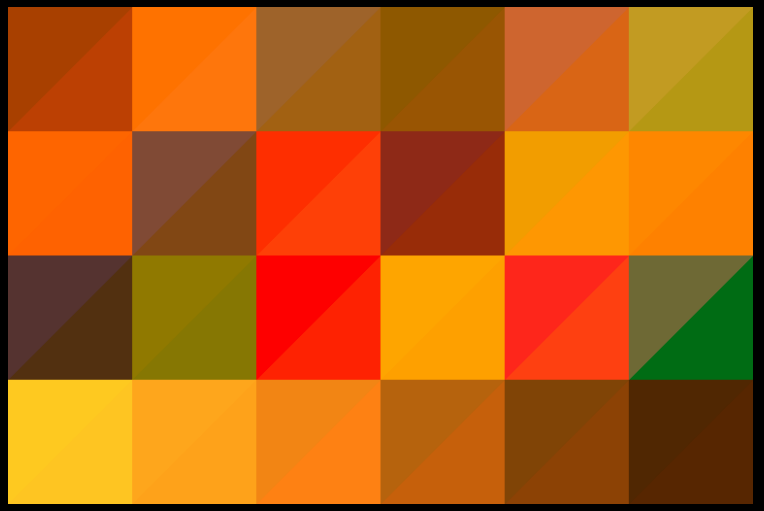
結果



フルスペクトル



XYZ

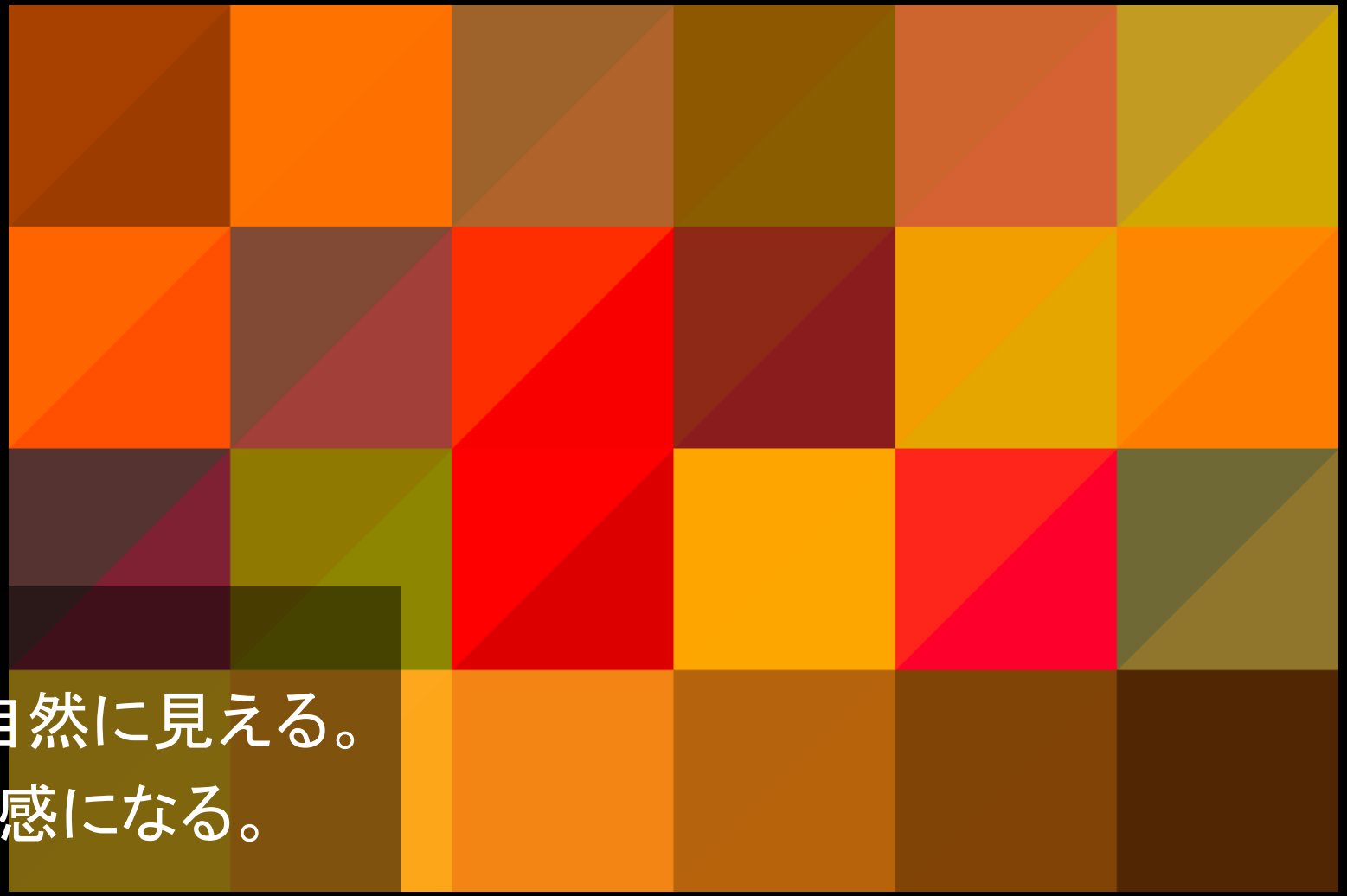


sRGB

フルスペクトル

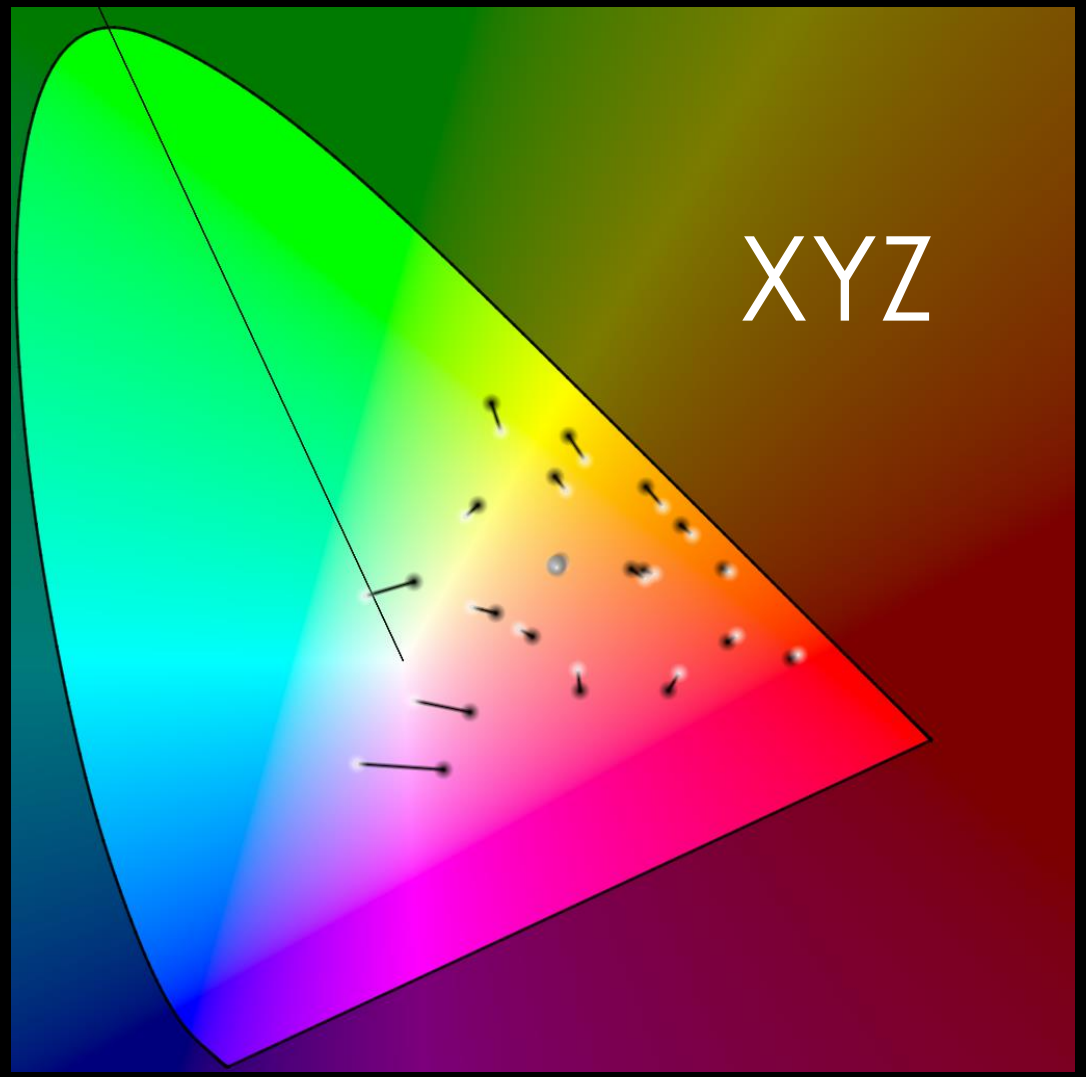
左上 フルスペクトル / 右下 XYZ

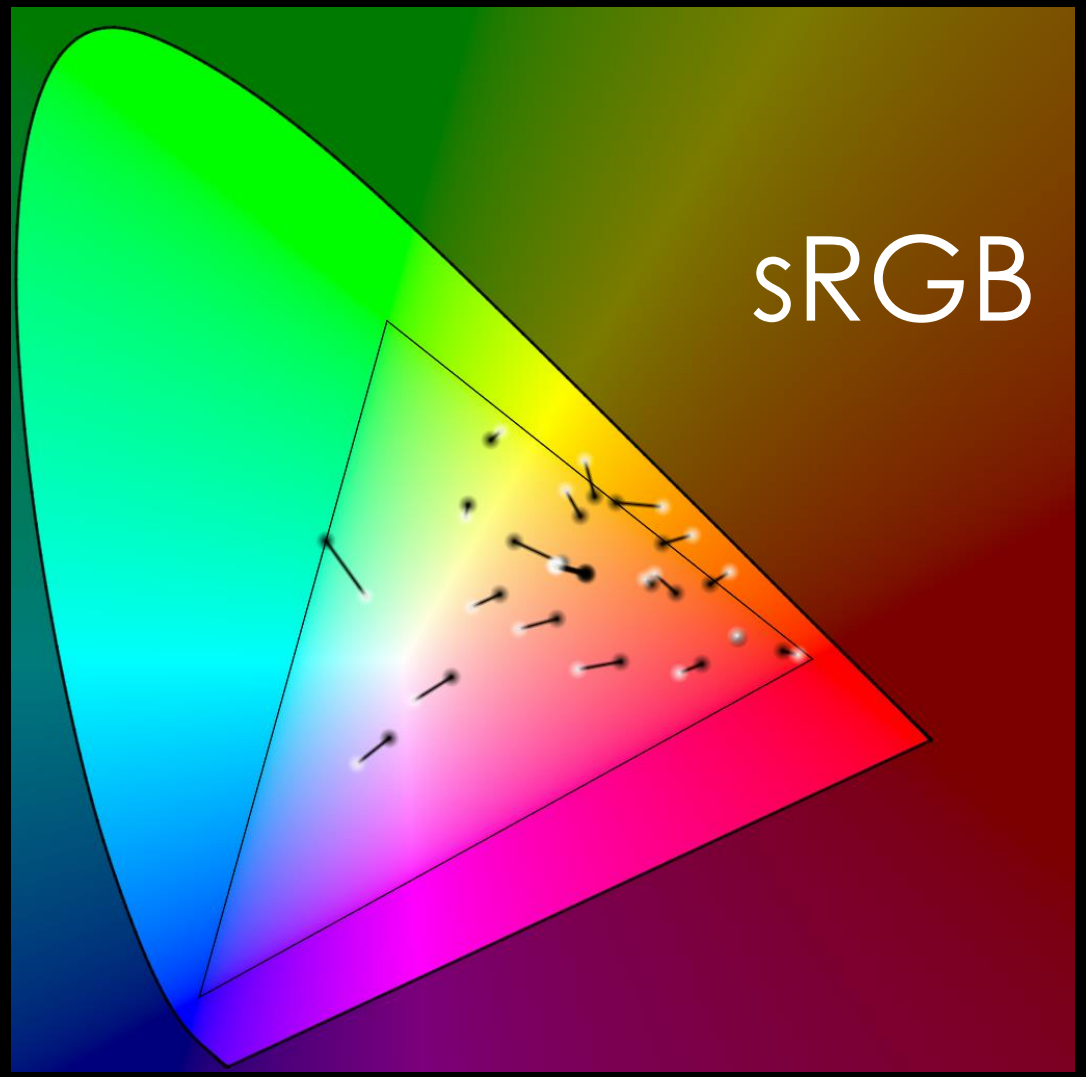
左上 フルスペクトル / 右下 sRGB



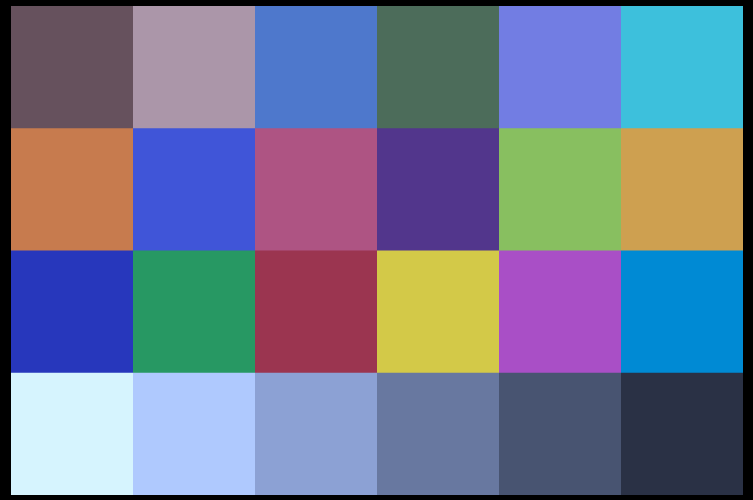
- どうせ色はズレる。
- 一貫してズレるほうが自然に見える。
- 一部だけ狂うのは違和感になる。

XYZは、色ごとの偏りが大きい。

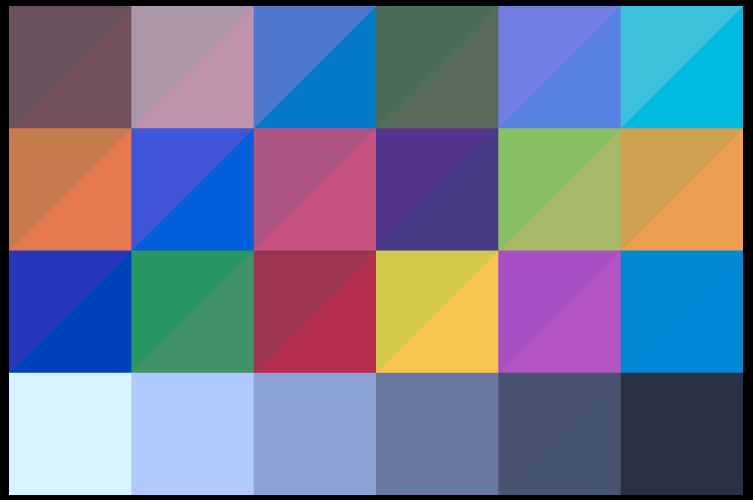




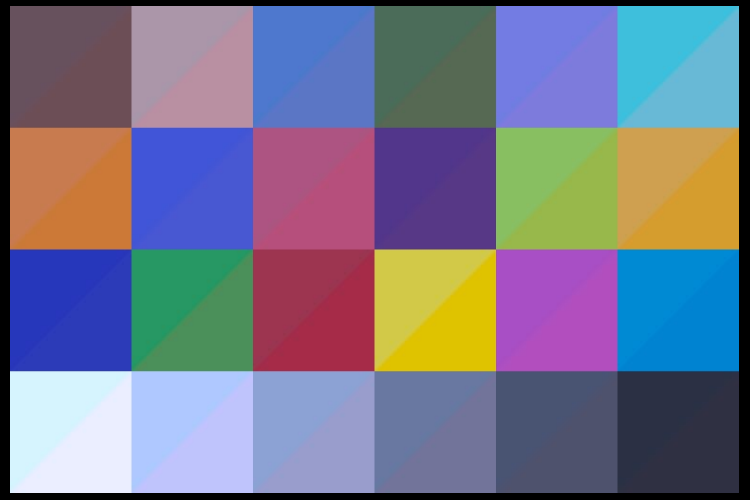
20000Kもテストしてみる



フルスペクトル



XYZ



sRGB

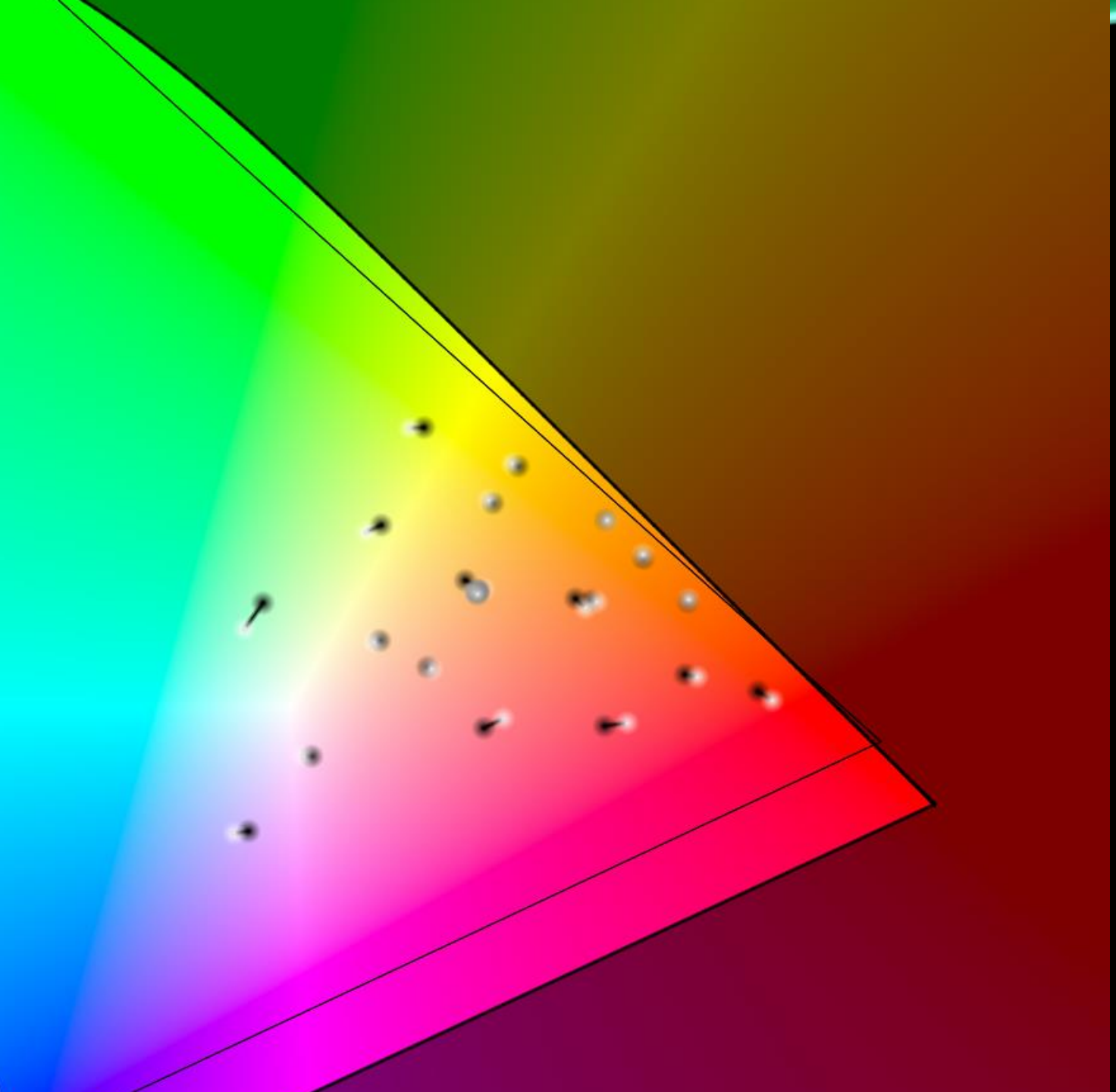
XYZ

sRGB

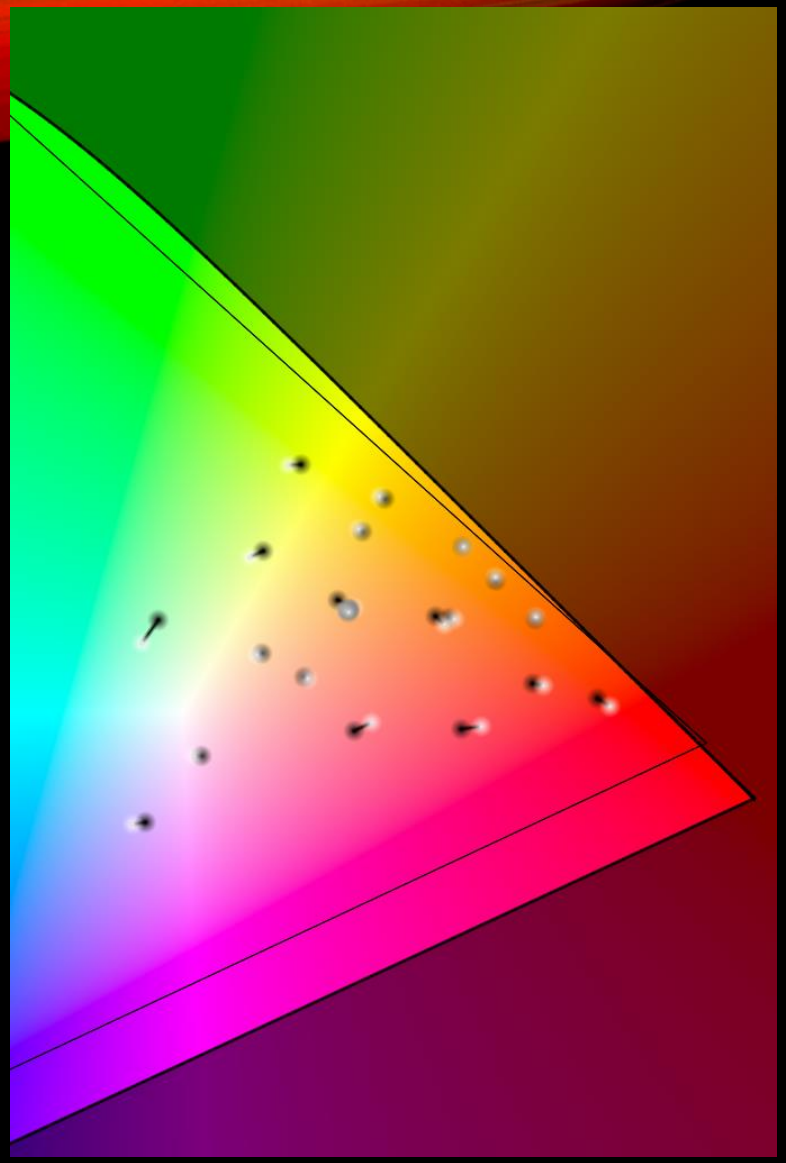
適材適所

- CIE1931XYZは、色の比較にはとても良い。
- レンダリング色空間に向いているわけではない。

- 最適な色空間はレンダリングするシーン次第。
  いろいろ試す必要がある。



おまけ



LMS色空間

- 錐体反応の推定値
- ホワイトバランス変換に使う空間。

- 色差がほかの1/4くらいに小さい!
- これぞ究極なのでは？？
  ・・・と思ったが。

LMS色空間

- 実際に使ってみると印象が合わない。
  普通のsRGBのほうが良いくらい。
- まだまだ研究が必要。
  いい空間見つけたら教えてください。

出力

sRGB

- PCモニターはほとんど “sRGB” という規格。
- HDTVは”Rec.709”という規格で、ほぼ同じ色空間。
- SDTVは”Rec.601”という規格で、ほぼ同じ色空間。

- つまり、sRGB色空間は出力の基本のキ。

sRGBとXYZの変換

- この空間の導出はすでにしましたが、おさらい。

sRGB<>XYZ

$$\begin{pmatrix} \mathrm{X} \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.412391 & 0.357585 & 0.180482 \\ 0.212639 & 0.71517 & 0.0721926 \\ 0.0193308 & 0.119195 & 0.950536 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \mathrm{R} \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.24097 & -1.53738 & -0.498612 \\ -0.969241 & 1.87596 & 0.0415554 \\ 0.0556299 & -0.203976 & 1.05697 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

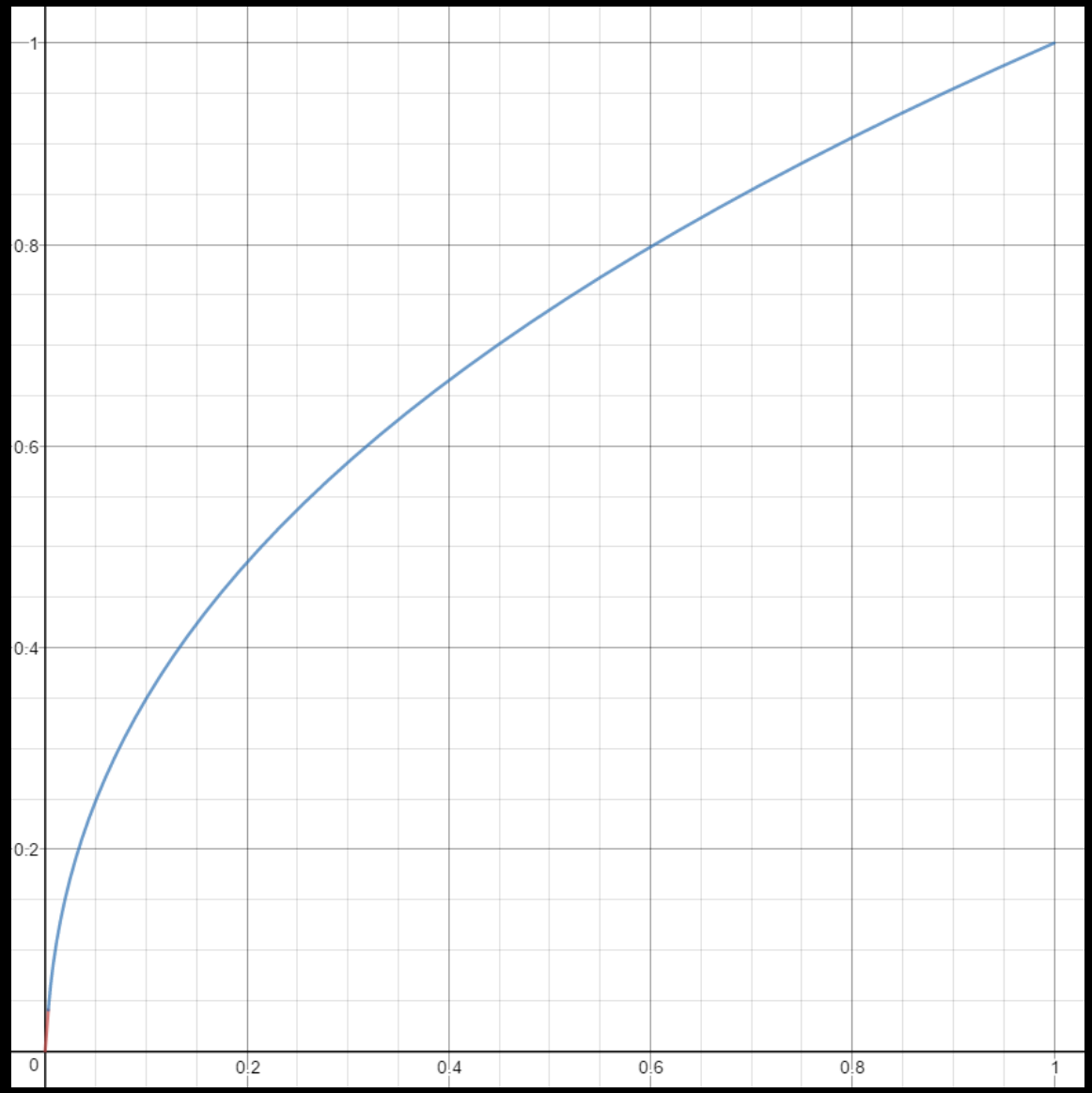
リニアとトーンカーブ

- sRGBのテレビは、信号を非線形に補正する特性がある。
- この非線形な補正を “トーンカーブ” / EOTF と呼ぶ。

トーンカーブ？

- 具体的には左の図。
- いわゆる「ガンマ変換」

- 昔のテレビの特性を
  引き継いでいる。



sRGBトーンカーブ

$$\begin{cases} O = 12.92 * C & (C < 0.0031308) \\ O = 1.055 * C^{\frac{1}{2.4}} - 0.055 & (C \geq 0.0031308) \end{cases}$$

- Cはリニア輝度, Oが出力すべき値。
- Cは[0,1]が[0-100cd/m^2]に相当する。
- Oは8bit出力なら[0-1]が[0-255]に相当。

Rec709 トーンカーブ

$$\begin{cases} O = 4.5 * C & (C < 0.018) \\ O = 1.099 * C^{\frac{1}{2.2}} - 0.099 & (C \geq 0.018) \end{cases}$$

- sRGBと若干係数が違うことに注意が必要。

2.2

- sRGBのガンマ変換って
  pow(x,1/2.2)じゃだめなの？

けっこう
ズレる。

$f(x) = 12.92x\{x < t\}\{x > 0\}$

$f_2(x) = (1+a)x^{\frac{1}{2.4}} - a\{x \geq t\}$

$a = 0.055$

-10 10

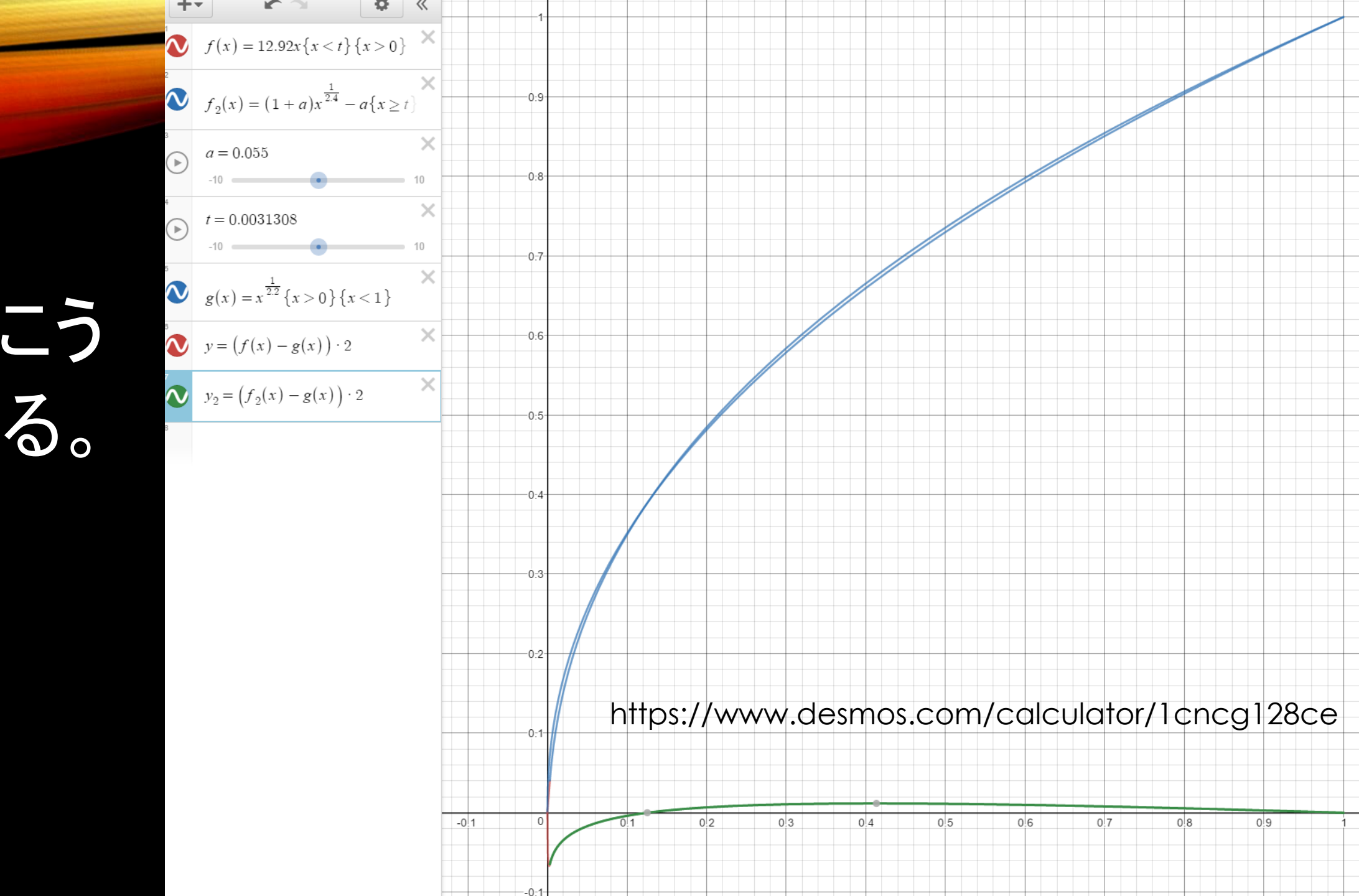
$t = 0.0031308$

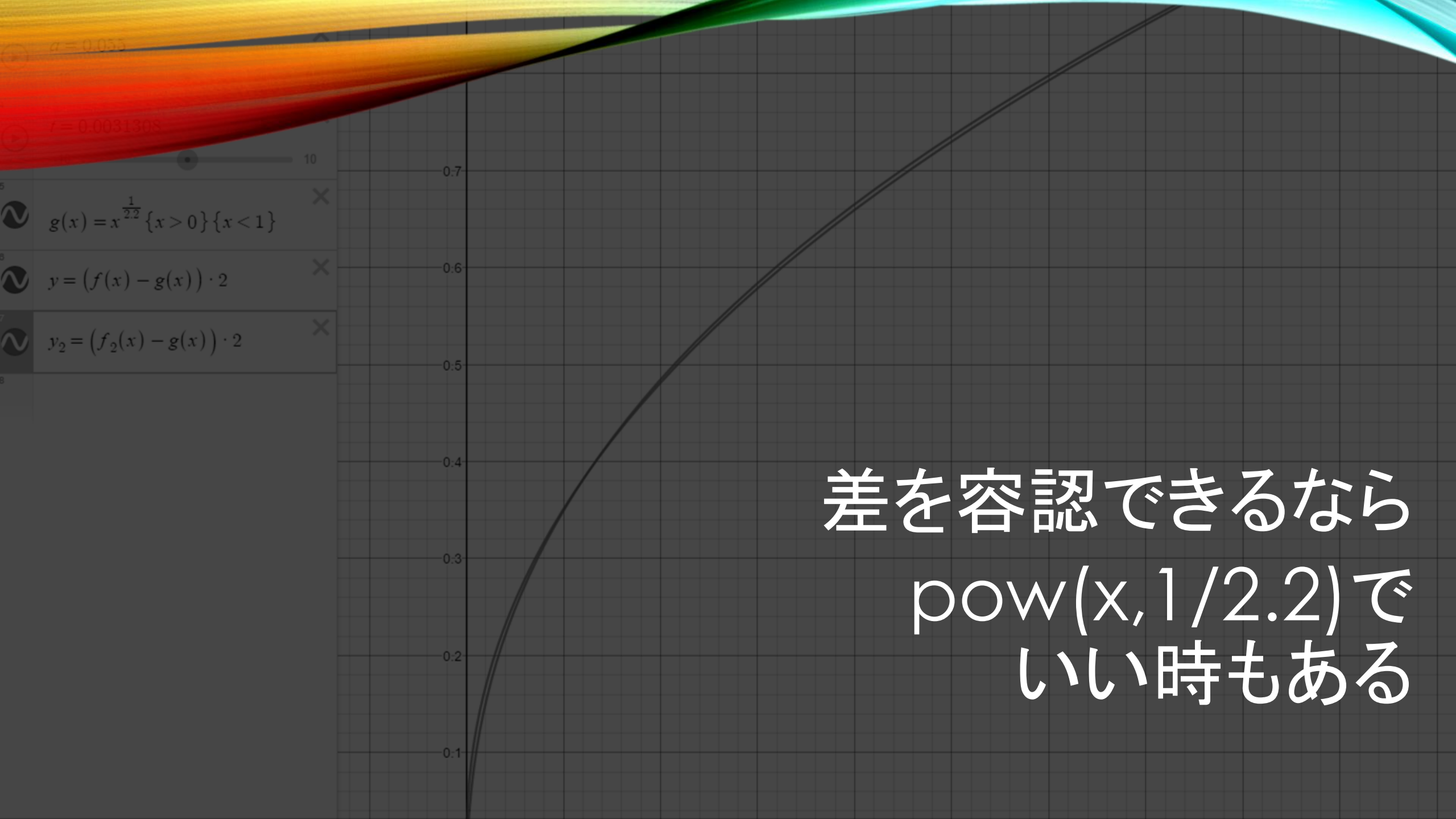
-10 10

$g(x) = x^{\frac{1}{2.2}}\{x > 0\}\{x < 1\}$

$y = \left(f(x) - g(x)\right) \cdot 2$

$y_2 = \left(f_2(x) - g(x)\right) \cdot 2$





差を容認できるなら
pow(x,1/2.2)で
いい時もある

ガンマは色空間？

- たまにある間違い。
- 「ガンマ色空間」？「リニア色空間」？

- ガンマ変換はトーンカーブなので、
  色は規定されていない。

- そもそもsRGBのカーブは単純なガンマではない…

現実のデバイス

- 現実のモニターは、sRGBそのままではない。
- 輝度が仕様よりもブーストされている。
- 白色点がD80-90。かなり青白い。
- 彩度とコントラストが強調される。
- 製品ごとのバラつきがとても大きい。

現実のデバイス対策。

- 色調整に使うモニターは、できるだけ良いものを使う。
  - 例えば、キャリブレータ内蔵のモニター。
- または、使うモニターをきちんと測定する。
  - 輝度、色度、ホワイトポイント。
- ユーザー環境は想像もつかない。
  ある程度諦める。ニュートラルな絵を出す。

弊社事例紹介

“Scapes”

- 現実の風景と良くマッチングした車両CGを用いたフォトモード

SPORT

Scapes制作に利用した色彩工学

- 複数カメラ間で色のマッチング
- カメラRAWのGamutリバースエンジニアリング
- 正確な色彩を計測・再現するワークフロー

- カメラを色彩測定器として使えるようにした

GT SPORT
RC F
LEXUS

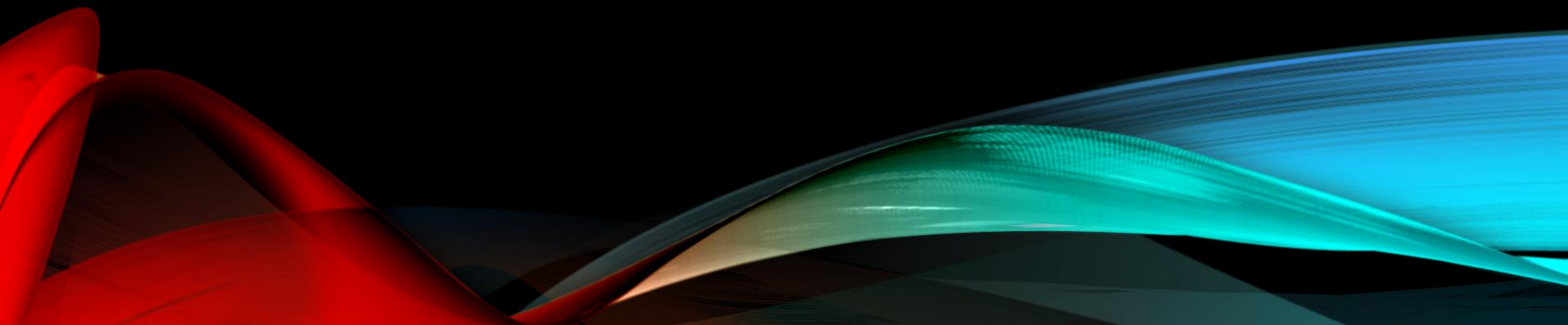
何がハッピーになったか

- 正確なライティングでマテリアルが確認できるように
- より客観的な色表現
- モデルとマテリアルの再現度がアップ

GT SPORT
NISSAN
GT3
nismo
YOKOHAMA
RECARO
MOTUL
www.ah-schulze.de

コースやアセットモデルも正確な色を計測すると
全てを合わせたときの説得力が向上します。

特にリアル系ゲームにおいては効果が大きい。



同刻 ドイツラインラント＝プファルツ州
アイフェル地方 ニュルブルクリンク

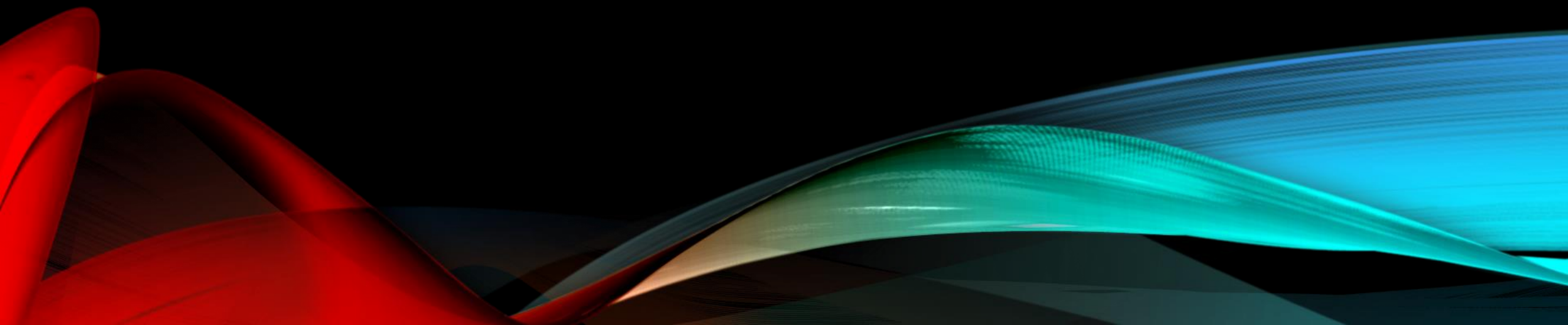
まとめ。

できるようになった

- 光から脳まで、色の仕組みを知った。
- 標準光源・標準観測者・標準色空間を知った。
- 計測した分光から、色度を計算できるようになった。
- 計測した分光から、物体色を計算できるようになった。
- カメラとカラーチャートを用いて、物体色を計算できるようになった。
- 複数のカメラ間での色が合わせられるようになった。
- ライティングした結果を、sRGB規格に合わせて、表示できるようになった。

世界は色で
満ち溢れています。

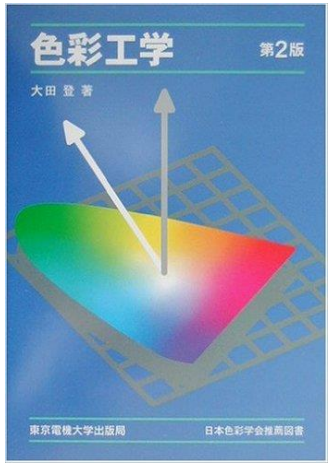
いつか虚色すらも表現できるデバイスや
フルスペクトルレンダリングの時代が来ることを信じて。



カラーチャートと分光計片手に、街に繰り出そう！

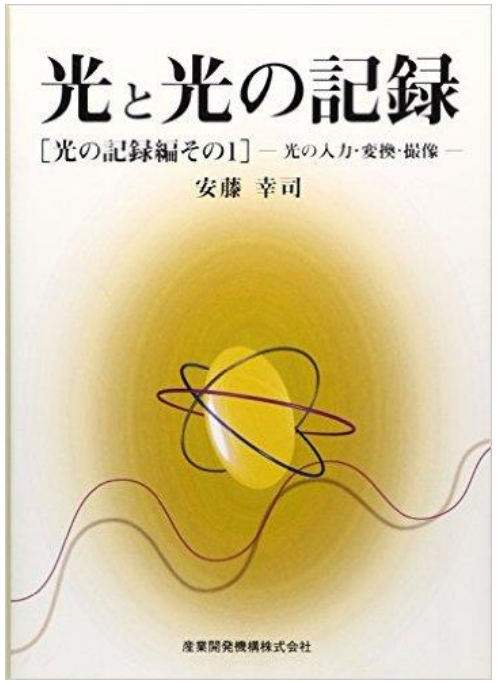
参考文献(1)

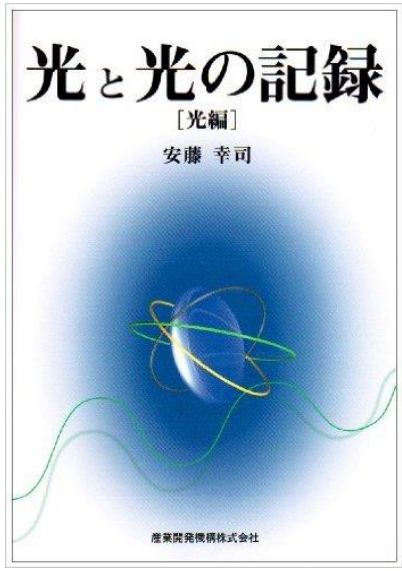
- 太田登
「色彩工学」
https://www.amazon.co.jp/dp/4501618906/
- 太田登
「色再現工学の基礎」
https://www.amazon.co.jp/dp/4339076449/
- 谷口 慶治,張 小忙
「デジタル色彩工学」
https://www.amazon.co.jp/dp/4320123298/
- 篠田 博之, 藤枝 一郎
「色彩工学入門」
https://www.amazon.co.jp/dp/4627846819/

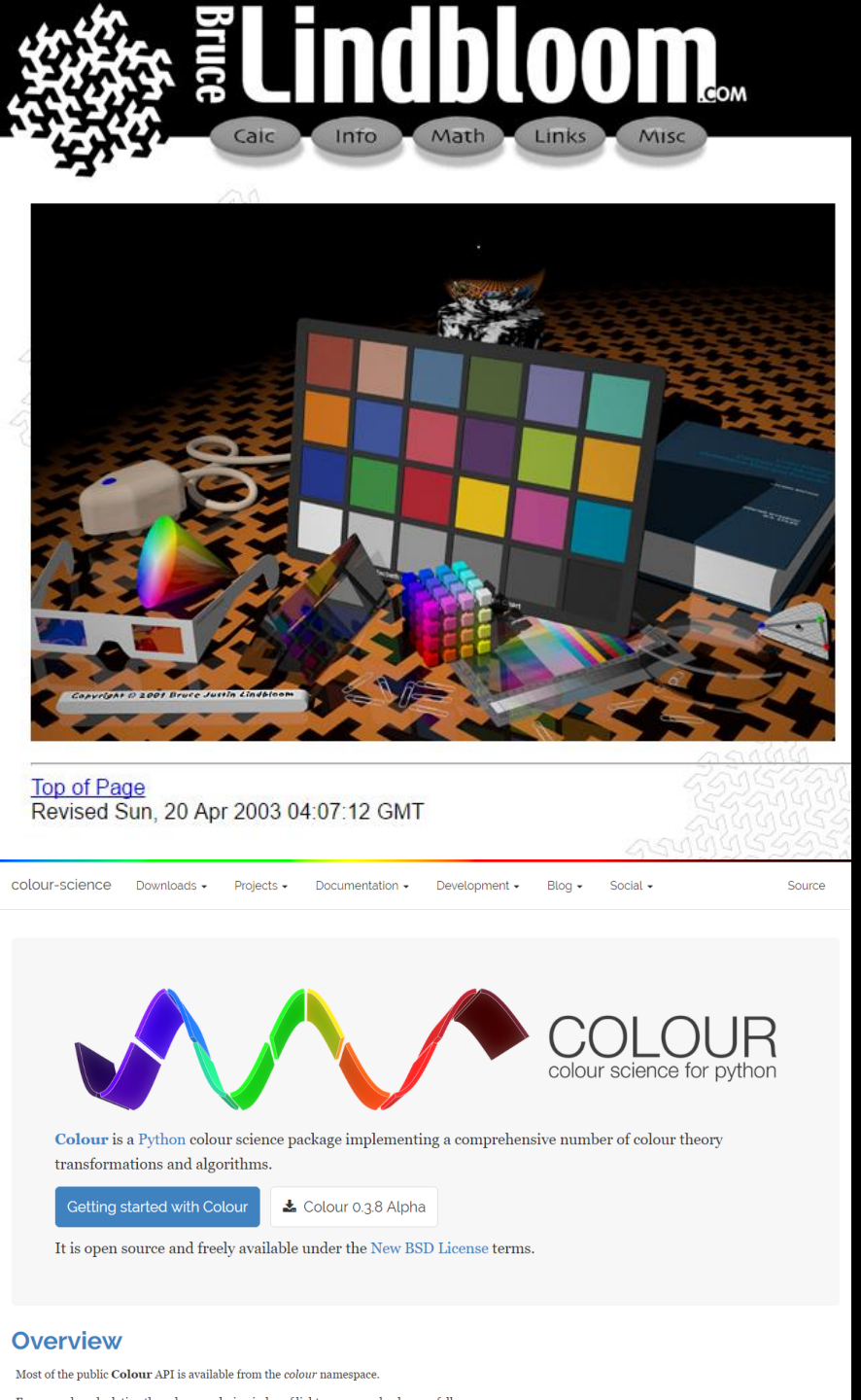


参考文献(2)

- 安藤 幸司
「光と光の記録」
https://www.amazon.co.jp/dp/4860281861/
https://www.amazon.co.jp/dp/4860280393/
https://www.amazon.co.jp/dp/4860280911/







参考文献(3)

- http://www.brucelindbloom.com/
- http://colour-science.org/
- http://www.oscars.org/science-technology/sci-tech-projects/aces
- http://www.ccs-inc.co.jp/s2_ps/s1/s_04/column/light_color/
- http://www.konicaminolta.jp/instruments/knowledge/color/index.html

おわり。

ゲームのための色彩工学 / CEDEC2016

Hajime UCHIMURA@Polyphony Digital Inc.

APPENDIX

- HDRテレビはRec.2020+ST2084。
- 色クラスを作るときは、{ 色空間ID, tristimulus[3] ; } みたいなのが良い。
- アルファチャンネルは色の特性ではなくて、物質特性。

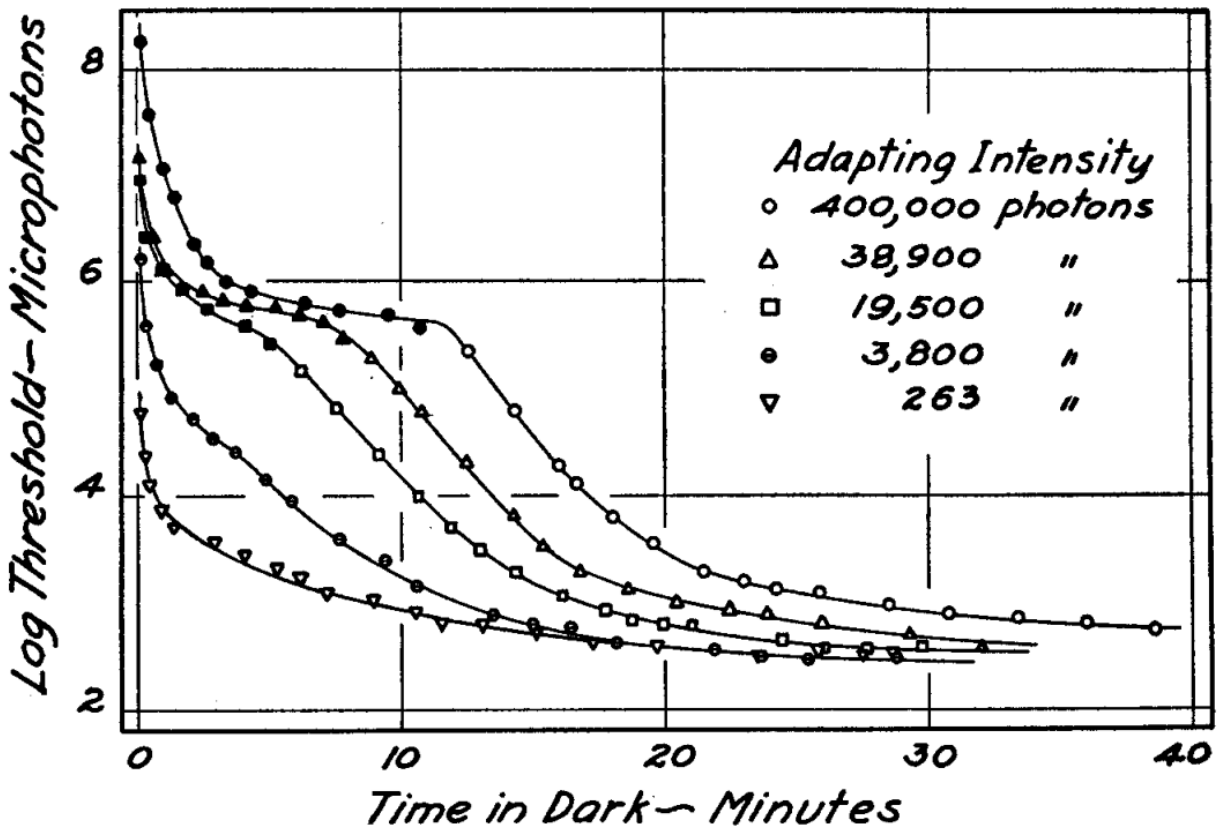
- ホワイトバランス補正はBradford変換が良い

BRADFORD

- $C_2 = M * C_1,$
- $M = M_A^{-1} \begin{pmatrix} \frac{L_D}{L_S} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{M_D}{M_S} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_D}{S_S} \end{pmatrix} M_A$ LMS_D, LMS_Sは照明光のXYZを下記で変換したもの
- $M_A = \begin{pmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{pmatrix}$ XYZからLMS反応値への変換
- $M_A^{-1} = \begin{pmatrix} 0.9869929 & -0.1470543 & 0.1599627 \\ 0.4323053 & 0.5183603 & 0.0492912 \\ -0.0085287 & 0.0400428 & 0.9684867 \end{pmatrix}$ LMSからXYZへの変換

順応

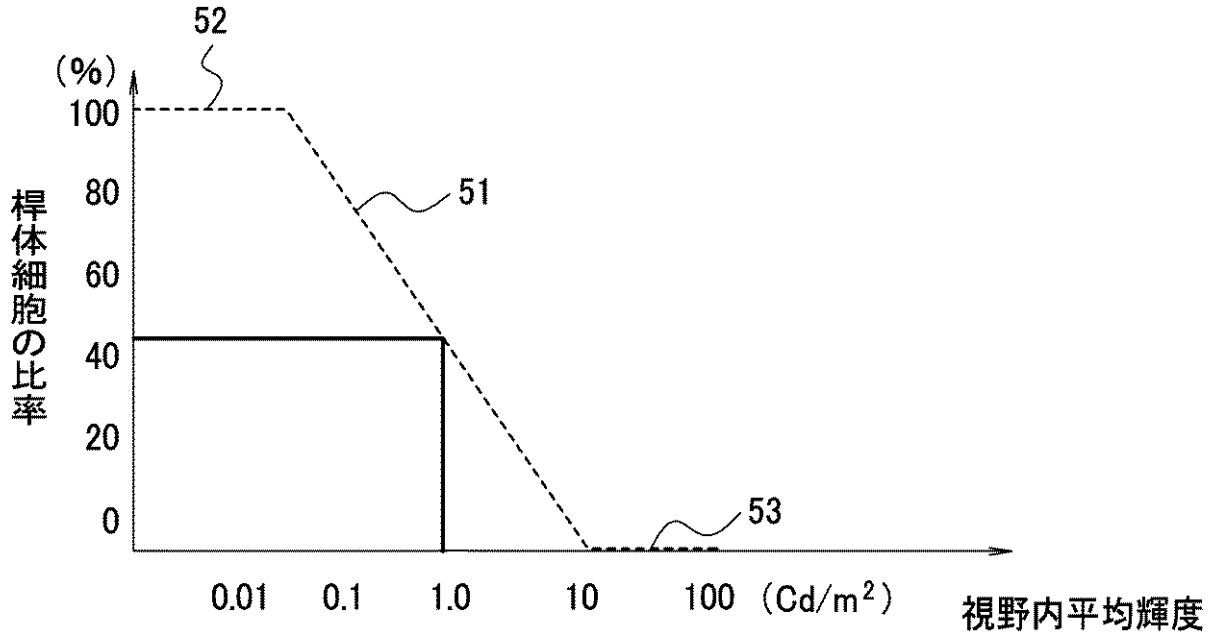
- 目は明るさ・暗さに対して順応します。
- 暗いと感度アップ(暗順応)
- 明るいと感度ダウン(明順応)
- 明順応は早く、暗順応は遅い。
- ヘクトによる調査結果。
  暗順応に従って暗所視に
  スイッチする過程が見えます。



THE INFLUENCE OF LIGHT ADAPTATION ON SUBSEQUENT DARK ADAPTATION OF THE EYE, Hecht et al.

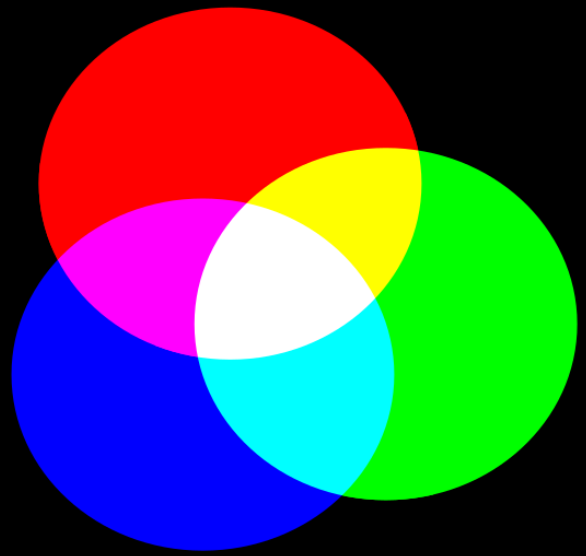
暗所視

- 暗いと桿体が優位になります。
  色が見えなくなります。
- 明るいと錐体が優位になります。
  色が見えるようになります。
- 視野内平均輝度0.1cd/m^2が
  閾値だと言われています。
- 右の図はキヤノンの特許から引用。
- 中間を薄明視と呼ぶ。
- 桿体細胞は青に感度が高く、
  過渡域の明るさ(薄明)では
  青いものがより明るく見えます。
- これをプルキンエ現象と呼ぶ。



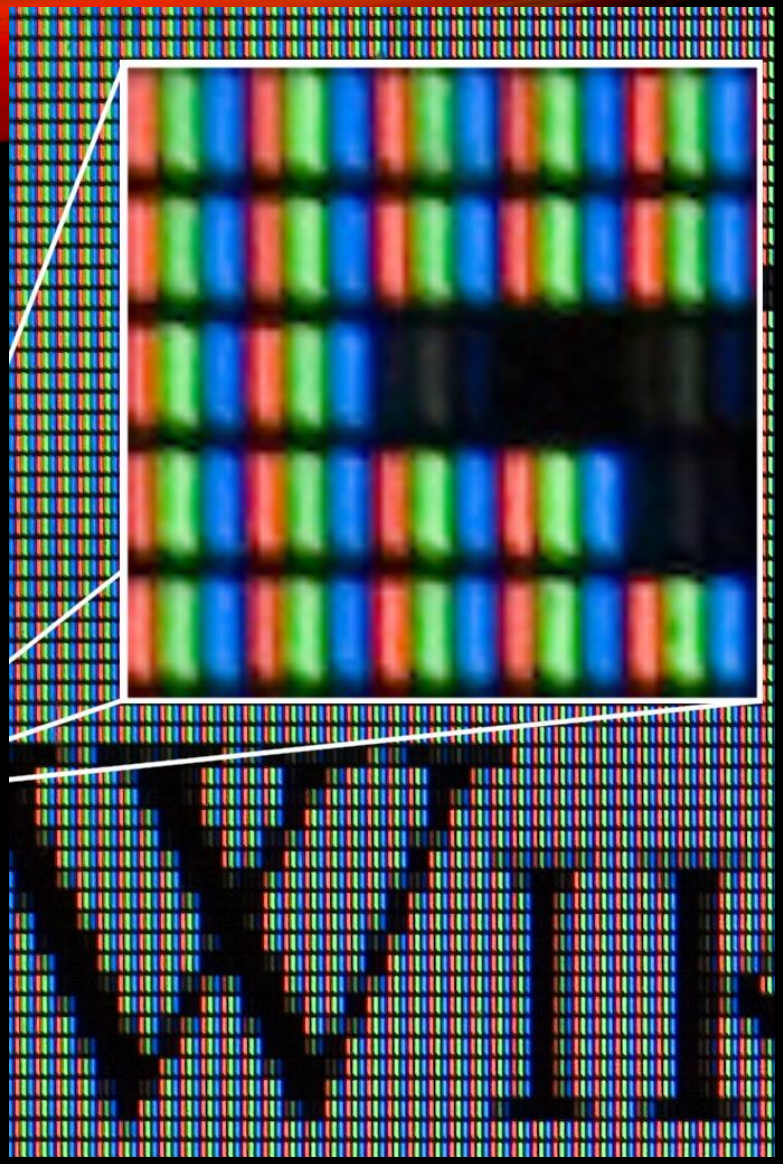
キヤノン株式会社による特許2015-099980公開文書より引用

色を混ぜるとは？



- ゲームにおける色は、ほぼ全て光の色です。
- 光は負にできないので、干渉しない限りは
  混ぜれば混ぜるほど光は強くなります(加法)
- 強いエネルギーの光は、より明るく感じられます。

- 印刷物は、濃くすると黒に近づく減法混色です
- 今日は触れません。



ディスプレイの混色

- 液晶モニターは、小さなピクセルの集まりです。
- それぞれのピクセルは、赤や緑、青の単色です。
- 遠くから見ると、混じり合い、複雑な色が出ます。

- 「並置混色」

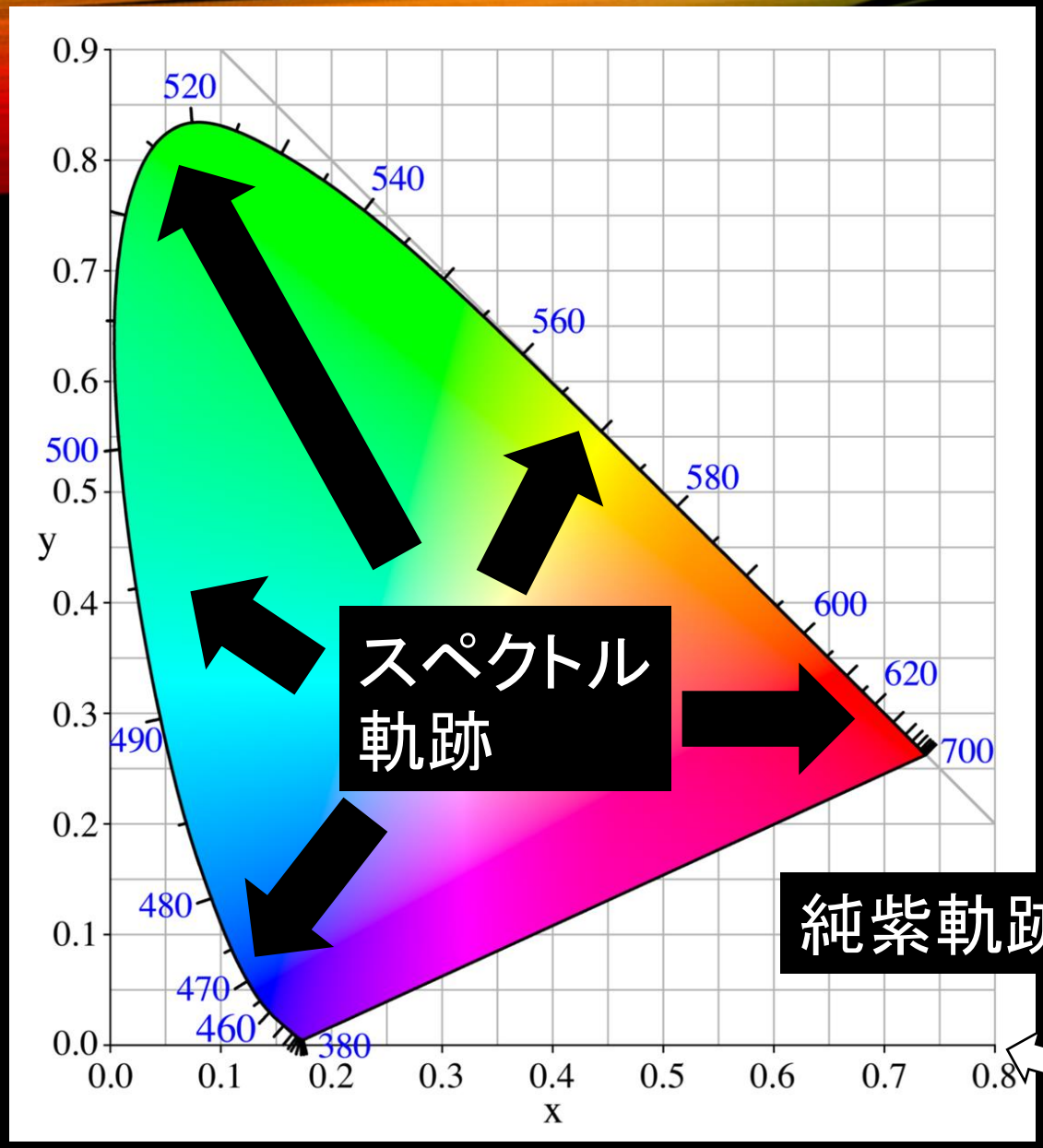
By No machine-readable author provided. Ravedave assumed (based on copyright claims). - No machine-readable source provided. Own work assumed (based on copyright claims)., CC 表示 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=710606

プロジェクタの混色

- プロジェクタは高速に原色を重ねて色を作っています。
- 「継時混色」

- 同時混色ではエネルギー量を増やせないので、「中間混色」と呼ばれることがあります。

http://av.watch.impress.co.jp/docs/20030910/marantz1.htm より引用



スペクトル軌跡は英語で
spectrum locusと呼びます。

蹄に似ているので
馬蹄形(horse shoe)とも呼ぶ

無輝線、アリクネ / alychne

比視感度は、物理量への足掛かり

- 比視感度を用いると、色座標を物理量にマップすることができます。
- 光は電磁波なので、エネルギー量を W(ワット) で表します。
- ある分光放射輝度 $Le(\lambda)\ [W\ /\ sr\ m^2\ nm]$ と比視感度Yの間に

$$Y = K \int_{\lambda} Le(\lambda)\bar{y}\, d\lambda$$

- という関係が成立します。nmで積分するので単位が[W/sr m^2]になる。
- 係数 K = 683 [lm/W] としたときのY刺激値を、輝度[cd / m^2]と呼びます。

(資料)さまざまなGAMUT

	CIE	NTSC	Adobe	rec709	rec2020	S.Gamut	S.Gamut3	ACES AP0	ACES AP1
xr	0.735	0.67	0.64	0.64	0.708	0.73	0.766	0.7347	0.713
yr	0.265	0.33	0.33	0.33	0.292	0.28	0.275	0.2653	0.293
xg	0.274	0.21	0.21	0.30	0.170	0.14	0.225	0	0.165
yg	0.717	0.71	0.71	0.60	0.797	0.855	0.800	1	0.83
xb	0.167	0.14	0.15	0.15	0.131	0.10	0.089	0.0001	0.128
yb	0.009	0.08	0.06	0.06	0.046	-0.05	-0.087	-0.077	0.044
W	E	C	D65	D65	D65	D65	D65	D60	D60

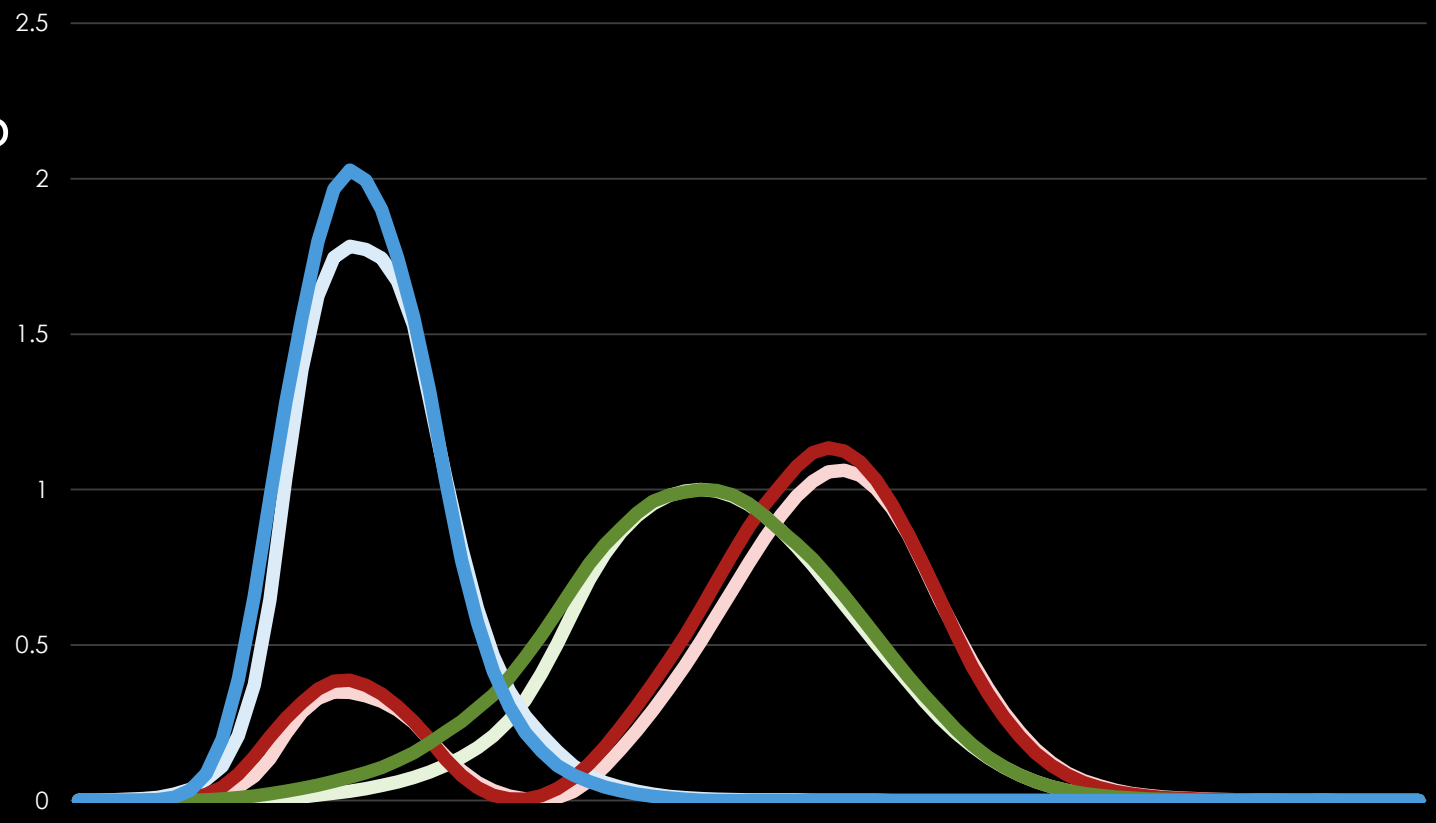
白色点 W の欄は、標準光源の名前(後述)

CIE1964XYZ

- 視野角が2度の実験結果
- 視野角が広いと等色関数が変わる

- 1964年に、10度で実験しなおした
  - “XYZ10”
  - “CIE 1964 XYZ”

- マイナー。あまり使われてない。



色空間の調べ方

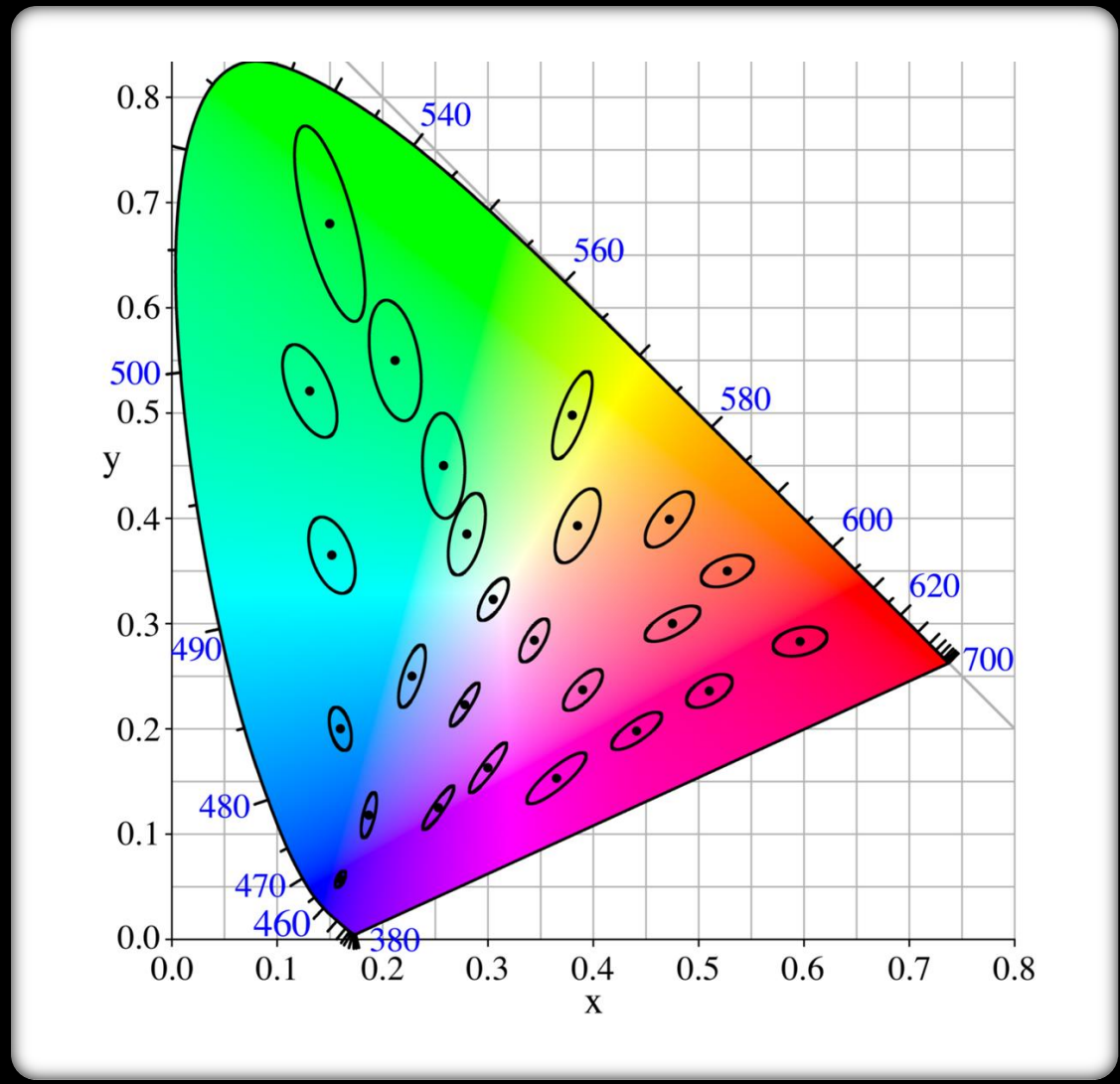
- まず規定の名前 + “primaries xy” などでググってみましょう。
- 日本語のWikipediaは間違いが多いです。
  例えば、sRGBと CIERGBを混同している。
- 英語のWikipediaは比較的正しい。

- SONYなどから、規格書が出ていることも。
- 各社RAWやREDなど、規格の非公開な色空間は、
  リバースエンジニアリングするしかない(後述)

マカダム楕円

- どれくらい不均等かを調べた図です。(10倍に強調)
- MacAdam'42 "Visual sensitivities to colour differences in daylight"

- 色が区別できない範囲のことを"JND(Just noticeable differences)"
- 楕円のサイズを「色弁別閾値」と呼ぶ



CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=173591

色差？

- 光の色を、定量的に表現できるようになりました。
- 色のペアがどれくらい似ているか、も定量化したい。
- 「色差」と呼ぶ。

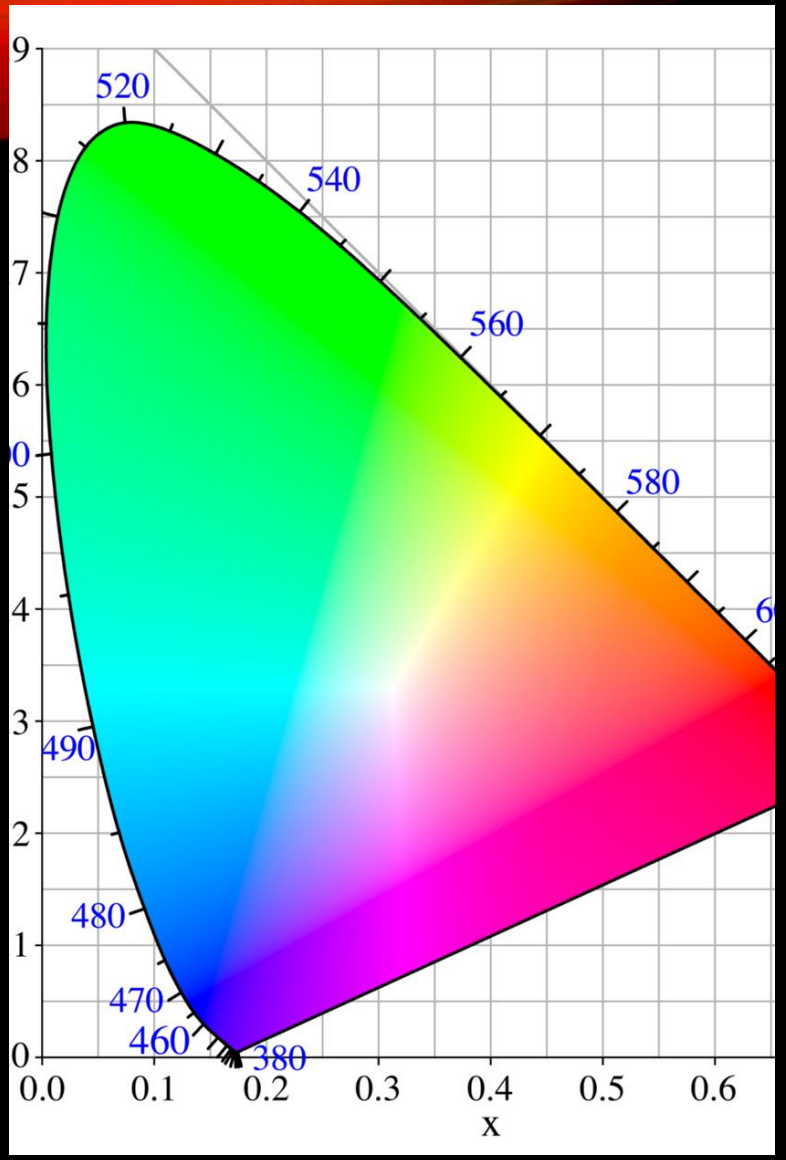
- 減色や圧縮、レンダリングの評価などに大活躍。

RGBの差じゃダメなの？

- 単純に、RGBそれぞれの差を取れば、何かの差は出てきます。
- しかしこれは等距離ではない。

- 人間は緑に敏感で青に鈍感ですが、
  RGBの差にはこれが反映されない。

- 感覚的に「均等」な色空間や、感覚的に「均等」な色差が欲しい。



xy色度は不均等

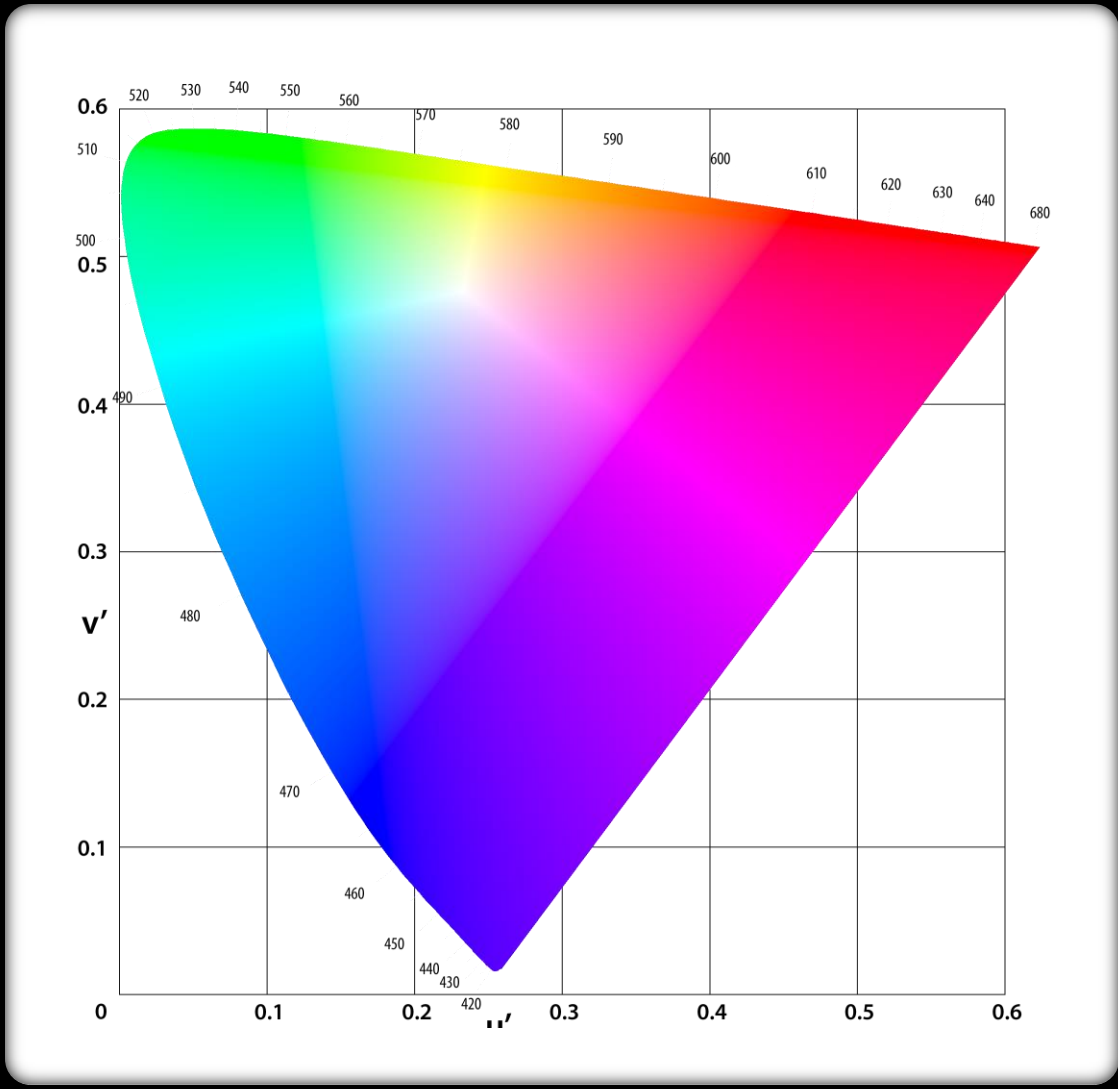
- 図から明らかに、xy色度は色の分布が不均等です。
- 緑は極端に広く、青が極端に狭い。

- 「均等色空間」を作ろう

CIE LUV

- 1960年にCIEがより均等な色度図を勧告。これを元に作られた均等色空間。
  - $u = \frac{4x}{-2x+12y+3}$
  - $v = \frac{6y}{-2x+12y+3}$
- かなりマイナーで、ほとんど死に絶えた。
- 色温度の計算だけ、この空間で行われる

- ただし右図はさらに改良された、CIE u'v'
  - $u' = u,\ v' = \frac{9y}{-2x+12y+3}$



By Adoniscik - Own work, Public Domain, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3770098

L？

- CIELUV色空間の “L” は、心理的測明度(lightness)

$$L^* = \begin{cases} 116\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \left(\frac{Y}{Y_0} > 0.008856\right) \\ 903.29\left(\frac{Y}{Y_0}\right) & \left(\frac{Y}{Y_0} < 0.008856\right) \end{cases}$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_0)$$
$$v^* = 13L^*(v' - v'_0)$$

ただしY_0, u'_0, v'_0は、そのシーン中にある最も明るい白色の色度。

色差ΔUV

- こうして変換した$L^*u^*v^*$座標を使うと、色の差を定量化することができます。
- 単純にユークリッド距離で計算できて、

$$\Delta E^*_{uv} = \sqrt{(L^*_1 - L^*_2)^2 + (u^*_1 - u^*_2)^2 + (v^*_1 - v^*_2)\text{^}2}$$

ただし、計算基準に白色点を含むので
異なる照明下での比較ができません

CIE LAB

- CIELUVよりも均等度の高い色空間として、CIE 1976 LAB色空間があります。
- LはCIELUVと同じです。色度a,bだけが違う。

$$a^* = 500\left[\left(\frac{X}{X_0}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}}\right]$$

$$b^* = 200\left[\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{\frac{1}{3}}\right]$$

- 色差計算は同様にユークリッド距離で、

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)\text{^}2}$$

CIE DE2000

- DeltaUV, DeltaABはどちらもまだ均等性が不十分なので
  CIEがさらに新しい色差CIE DE2000を提案しました。(詳しくは資料見て!)

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C''}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C''}{k_C S_C}\frac{\Delta H'}{k_H S_H}}$$

$$\Delta L' = L_1^* - L_2^*, \bar{L} = \frac{L_1^* + L_2^*}{2}, \qquad \bar{C} = \frac{C_1^* + C_2^*}{2}$$

$$a_1' = a_1^* + \frac{a_1^*}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right), a_2' = a_2^* + \frac{a_2^*}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right)$$

$$\bar{C}' = \frac{C_1'' + C_2''}{2}, \Delta C' = C_2' - C_1', C_1' = \sqrt{a_1'^2 + b^{*2}_1}, C_2' = \sqrt{a_2'^2 + b^{*2}_2}$$

CIE DE2000(2)

$$h'_1 = atan2(b_1^*, a'_1)\ mod\ 360°, h'_2 = atan2(b_2^*, a'_2)\ mod\ 360°,$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h'_2 - h'_1 & |h'_1 - h'_2| \le 180° \\ h'_2 - h'_1 + 360°\ for\ |h'_1 - h'_2| > 180°, h'_1 + h'_2 < 360° \\ h'_2 - h'_1 - 360° & |h'_1 - h'_2| > 180°, h'_1 + h'_2 \ge 360° \end{cases}$$

$$T = 1 - 0.17\cos(\bar{H}' - 30°) + 0.24\cos(2\bar{H}') + 0.32\cos(3\bar{H}' + 6°) - 0.20\cos(4\bar{H} - 63°)$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L} - 50)^2}}, S_C = 1 + 0.045\bar{C}', S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T$$

$$R_T = -2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}\sin(60°e^{-\left(\frac{\bar{H}' - 275°}{25°}\right)^2})$$

これは複雑すぎるので、どこか資料を参照して実装してください。

xyY色空間

- Y = Y
- x = x / (X+Y+Z)
- y = y / (X+Y+Z)

- 逆変換は以下の通り。
  - X=x*Y/y
  - Y=Y
  - Z=(1-x-y)*Y/y

xyY色空間(2)

- 目的は、色合いと明るさの分離。

- x,yは、色合い(色度)
- Yはその光の明るさを示す。

- 実質XYZ色空間なので、Yxy空間のような変形色空間を「表色系」と呼ぶことがある。
- HSV色空間も同様。

光源影響の除去

- raw_RGB = XYZ_to_RAW(Patch_XYZ)
- Patch_XYZの代わりに、
  D65 Rec709における各パッチの色座標を入れるとどうなるでしょうか。
- raw_RGB = D65_Rec709_to_RGB(D65_Rec709_patch)

光源影響の除去(2)

- カメラの補正と同様に逆行列を求めると、

D65_Rec709_patch = RAW_to_D65_Rec709(raw_RGB)

- RAWからD65_Rec709の色への変換行列が得られます。
- Rec709以外の色空間も同様です。